

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Bertović

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Dr. sc. Nenad Ferdelji, dipl. ing.

Student:
Iva Bertović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se obitelji na bezuvjetnoj potpori tokom studiranja te mentoru doc. dr. sc. Nenadu Ferdeljiju na pruženoj pomoći i savjetima tokom pisanja završnog rada.

Iva Bertović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
1.1. Izmjenjivači topline	1
1.1.1. Općenito	1
1.1.2. Podjela izmjenjivača topline	1
1.2. Lamelni izmjenjivači topline	3
1.2.1. Općenito	3
1.2.2. Konstrukcija	3
1.2.3. Utjecaj na prijenos topline.....	4
1.2.4. Primjena	5
1.3. Shell & Tube izmjenjivači topline.....	5
1.3.1. Općenito	5
1.3.2. Konstrukcija	6
1.3.3. Primjena	7
2. ODREĐIVANJE POVRŠINE LAMELNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE	8
2.1. Konstrukcijski proračun	9
2.2. Termodinamički proračun	12
2.2.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka.....	15
2.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani vode.....	18
2.2.3. Koeficijent prolaza lamelnog izmjenjivača topline.....	20

2.3. Utjecaj cjevnih prolaza	20
3. USPOREDBA POVRŠINA IZMJENJIVAČA TOPLINE	22
3.1. Lamelni izmjenjivač topline s protusmjernim strujanjem ogrjevnog medija	22
3.1.1. Konstrukcijski proračun	23
3.1.2. Termodinamički proračun	24
3.1.2.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka	25
3.1.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani vode	28
3.1.2.3. Koeficijent prolaza lamelnog izmjenjivača topline	28
3.1.3. Utjecaj cjevnih prolaza	28
3.2. Lamelni izmjenjivač topline s istosmjernim strujanjem ogrjevnog medija	30
3.2.1. Utjecaj cjevnih prolaza	30
3.3. Shell and Tube izmjenjivač topline	33
3.3.1. Konstrukcijski proračun	34
3.3.2. Termodinamički proračun	35
3.3.2.1. Koeficijent prijelaza na strani zraka	35
3.3.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani vode	37
3.3.2.3. Koeficijent prolaza Shell and Tube izmjenjivača topline	38
3.3.3. Stvarna duljina izmjenjivača i izlazna temperatura vode	38
3.3.4. Utjecaj promjene geometrijskih karakteristika izmjenjivača	39
3.4. Analiza dobivenih rezultata	40
4. ZAKLJUČAK	42
LITERATURA	44
PRILOZI	45

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Osnovna podjela izmjenjivača topline	1
Slika 1.2. Istosmjerni tip rekuperatora; [4]	2
Slika 1.3. Protusmjerni tip rekuperatora; [4]	2
Slika 1.4. Križni tip rekuperatora; [4]	3
Slika 1.5. a) Primjeri lamela unutar cijevi; b) Primjeri uzdužnih lamela na cijevi; [6]	4
Slika 1.6. Osnovne strukture lamelnih izmjenjivača topline; [7]	4
Slika 1.7. Presjek Shell and Tube izmjenjivača topline; [8]	5
Slika 1.8. a) Zmijoliki oblik cijevi; b) Spiralni oblik cijevi; c) Cjevna stijenka; [6]	6
Slika 1.9. Primjeri pregrada u Shell and Tube izmjenjivaču topline; [6]	6
Slika 2.1. Konstrukcija zadanog izmjenjivača topline	8
Slika 2.2. Presjek lamele u izmjenjivaču	10
Slika 3.1. Protusmjerni Shell and Tube izmjenjivač topline	33

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Parametri cijevi	9
Tablica 2.2. Parametri lamela.....	9
Tablica 2.3. Parametri zraka.....	12
Tablica 2.4. Parametri vode.....	12
Tablica 2.5. Svojstva zraka pri $\vartheta_{m,zr} = 16,5$ [°C]	13
Tablica 2.6. Svojstva vode pri $\vartheta_w' = 140$ [°C]	13
Tablica 3.1. Parametri zraka.....	22
Tablica 3.2. Parametri vode.....	22
Tablica 3.3. Svojstva zraka pri $\vartheta_{m,zr} = 16,5$ [°C]	24
Tablica 3.4. Svojstva vode pri $\vartheta_w' = 140$ [°C]	24
Tablica 3.5. Dimenzije cijevi	33
Tablica 3.6. Utjecaj promjene geometrijskih karakteristika izmjenjivača	39
Tablica 3.7. Duljine izmjenjivača topline	40
Tablica 4.1. Rezultati usporedbe izmjenjivača.....	42

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A	m^2	Površina izmjene topline po jednoj cijevi
a	-	Operator
A_0	m^2	Površina između dvije lamele kroz koju struji zrak
$A_{0,uk}$	m^2	Ukupna površina između dvije lamele kroz koju struji zrak prije cijevi
$A_{1,uk}$	m^2	Ukupna površina poprečnih presjeka svih cijevi
a_f	m	Slobodni razmak između lamela
A_{ft}	m^2	Površina lamele po jednoj cijevi
A_i	m^2	Unutarnja površina cijevi
A_p	m^2	Površina poprečnog presjeka plašta
A_s	m^2	Površina između dvije lamele i cijevi kroz koju struji zrak
A_{sf}	m^2	Površina jedne lamele
A_t	m^2	Površina cijevi uzimajući u obzir i lamele
$A_{t,uk}$	m^2	Ukupna površina izmjene topline
A_{t0}	m^2	Površina cijevi bez lamela
A_u	m^2	Površina poprečnog presjeka jedne cijevi
$A_{u,uk}$	m^2	Ukupna površina kroz koju struji voda
A_{uk}	m^2	Ukupna površina izmjene topline u izmjenjivaču
B	-	Operator
b_f	m	Širina lamele
C_1	W/K	Toplinski kapacitet vode
C_2	W/K	Toplinski kapacitet zraka
$c_{p,w}$	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet vode
$c_{p,zr}$	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet zraka
d_0	m	Vanjski promjer cijevi
d_{ekv}	m	Ekvivalentni promjer
d_i	m	Unutarnji promjer cijevi
D_i	m	Unutarnji promjer plašta
F	-	Korekcijski faktor

k	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline
l^*	m	Stvarna duljina cijevi
l_f	m	Duljina lamele
n_c	-	Broj cijevi
n_f	-	Broj lamela za pretpostavljenu duljinu cijevi
n_f^*	-	Stvarni broj lamela
n_p	-	Broj cjevnih prolaza
NTU_1	-	Broj prijenosnih jedinica
Nu	-	Nusseltov broj
n_{uk}	-	Ukupan broj cijevi unutar izmjenjivača
P_1	-	Bezdimenzijska značajka temperature promjene
Pr	-	Prandtlov broj
p_{zr}	Pa	Tlak zraka
$q_{m,w}$	kg/s	Maseni protok vode
$q_{m,zr}$	kg/s	Maseni protok zraka
$q_{v,w}$	m ³ /s	Volumni protok vode
$q_{v,zr}$	m ³ /s	Volumni protok zraka
R_1	-	Omjer toplinskih kapaciteta struja u izmjenjivaču
Re	-	Reynoldsov broj
s	m	Razmak između gornjih površina lamela
s_t	m	Udaljenost od središnje osi jedne cijevi do središnje osi druge cijevi
w_0	m/s	Brzina zraka među lamela prije cijevi
w_s	m/s	Kritična brzina zraka
w_w	m/s	Brzina vode u cijevi
w_{zr}	m/s	Brzina zraka
X	-	Operator
α_i	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani vode
α_m	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka. ne uzimajući u obzir lamele
α_v	W/(m ² K)	Virtualni koeficijent prijelaza topline
α_w	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani vode
α_{zr}	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka
δ_c	m	Debljina stijenke cijevi
δ_f	m	Debljina lamele
δ_i	-	Operator

δ_y	m	Udaljenost od ruba do ruba cijevi
ζ	-	Operator
η_f	-	Iskoristivost lamela
Δg_1	°C	Temperaturni gradijent vodenog toka u izmjenjivaču
Δg_m	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika
$g_{m,zr}$	°C	Srednja temperatura zraka
g_w'	°C	Ulazna temperatura vode
g_{zr}'	°C	Ulazna temperatura zraka
g_{zr}''	°C	Izlazna temperatura zraka
λ_c	W/(m K)	Toplinska provodnost cijevi
λ_f	W/(m K)	Toplinska provodnost lamele
λ_w	W/(m K)	Toplinska provodnost vode
λ_{zr}	W/(m K)	Toplinska provodnost zraka
μ_i	-	Operator
μ_w	Pa s	Dinamička viskoznost vode
μ_{zr}	Pa s	Dinamička viskoznost zraka
ν_w	m ² /s	Kinematička viskoznost vode
ν_{zr}	m ² /s	Kinematička viskoznost zraka
π	-	Ludolfov broj
ρ_w	kg/m ³	Gustoća vode
ρ_{zr}	kg/m ³	Gustoća zraka
Φ	W	Toplinski tok koji voda predaje zraku
φ	-	Operator
φ'	-	Operator



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Iva Bertović**

Mat. br.: 0035190431

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zagrijavanje zraka u lamelnim izmjenjivačima topline**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Air heating in finned tube heat exchangers**

Opis zadatka:

Za zagrijavanje 2400 m³/h zraka stanja 1 bar i 8 °C na temperaturu 25 °C koristi se lamelni izmjenjivač topline s četiri cijevi dimenzija ϕ 16,7 x 1 mm izrađene od nehrđajućeg čelika (St. 1.4301) s četiri prolaza na cijevnoj strani. Kroz cijevi struji 0,175 l/s kapljevite vode ulazne temperature 140 °C

Lamele su pravokutne i napravljene od aluminijske. Dimenzije lamela su 600 x 300 x 0,18 mm. Razmak između lamela iznosi 2 mm.

U okviru rada potrebno je odrediti:

- površinu izmjenjivača topline (broj lamela) uz uvjet da je strujanje ogrjevnog medija u susjednim prolazima protusmjerno,
- površinu izmjenjivača topline (broj lamela) uz uvjet da je strujanje ogrjevnog medija u susjednim prolazima istosmjerno,
- površinu izmjenjivača topline tipa shell & tube (bez pregrada) u kojem bi se ostvario traženi toplinski učin na strani zraka, računajući s istom ulaznom temperaturom vode i istim dimenzijama cijevi (maseni protok vode, broj cijevi i izlaznu temperaturu vode odrediti iz konstrukcije izmjenjivača).

Dobivene je rezultate potrebno analizirati i komentirati.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć mentora.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SAŽETAK

Tema ovog rada je zagrijavanje zraka u lamelnim izmjenjivačima topline te njihova međusobna usporedba i usporedba sa Shell and Tube izmjenjivačem topline.

Prije proračuna izmjenjivača, u 1. poglavlju objašnjavaju se pojmovi izmjenjivača topline, lamelnog izmjenjivača i Shell and Tube izmjenjivača topline. Navode se podjele, konstrukcije i primjene izmjenjivača. Potom se u 2. poglavlju provodi primjer konstrukcijskog i termodinamičkog proračuna lamelnog izmjenjivača topline koji se koristi kasnije u radu. U 3. poglavlju proračunavaju se lamelni i Shell and Tube izmjenjivači topline, pri istim zadanim parametrima, kako bi se usporedile njihove veličine i izlazni parametri. Na kraju rada, rezultati se uspoređuju i argumentiraju u 4. poglavlju.

Ključne riječi: Lamelni izmjenjivač topline, protusmjerno strujanje, istosmjerno strujanje, Shell and Tube izmjenjivač topline

SUMMARY

The topic of this thesis is air heating in finned tube heat exchangers, as well as a comparison between them and a comparison with the Shell and Tube heat exchanger.

Prior to the exchanger analysis, Chapter 1 will feature the explanations of the terms heat exchanger, finned tube heat exchanger, and the Shell and Tube heat exchanger. The divisions, designs and uses of the exchangers will be stated. In Chapter 2, an example of a design analysis and a thermodynamic analysis of the finned tube heat exchanger will be shown, which will be used later in the thesis. In Chapter 3, the finned tube heat exchanger and the Shell and Tube heat exchanger will be analyzed, with the same set parameters, in order to compare their size and output parameters. Finally, the results will be compared and discussed in Chapter 4.

Keywords: finned tube heat exchanger, shell and tube heat exchanger, cocurrent flow, countercurrent flow

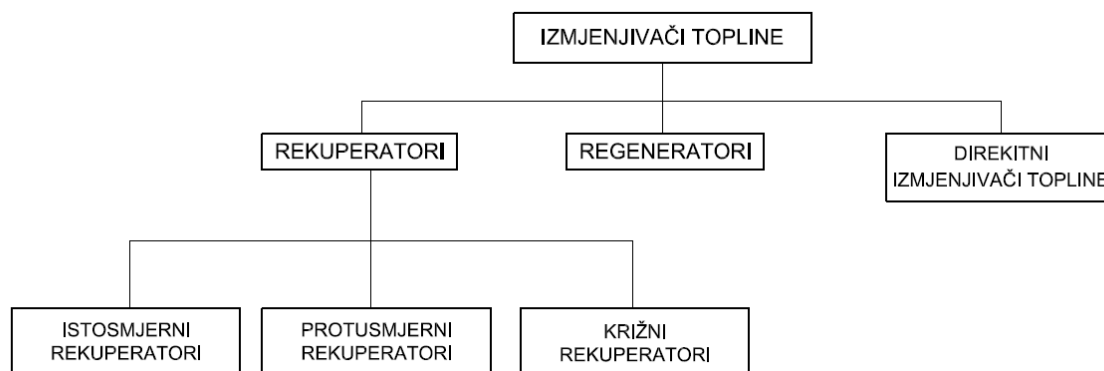
1. UVOD

1.1. Izmjenjivači topline

1.1.1. Općenito

Izmjenjivači topline su uređaji koji se koriste za prijenos topline između dva ili više fluida. Pri tome jedan fluid se hladi, a drugi zagrijava. Fluidi u izmjenjivaču mogu biti odvojeni stijenkom ili zidom, koji sprječavaju njihov izravan dodir, ili mogu biti u direktnom kontaktu, npr. miješalište. Imaju vrlo široku primjenu i to u: postrojenjima centralnog grijanja (bojleri, radijatori), postrojenjima za pripremu potrošne tople vode, rashladnim sustavima (isparivači, kondenzatori), kemijskoj i prehrambenoj industriji kao zagrijači, kondenzatori, kristalizatori, sušionice itd. Također veliku primjenu imaju u termoenergetskim postrojenjima kao parni kotlovi, pregrijači pare, zagrijači zraka, ekonomajzeri itd. U ovom radu, radi se o procesu zagrijavanja zraka; [1], [2], [3].

1.1.2. Podjela izmjenjivača topline



Slika 1.1. Osnovna podjela izmjenjivača topline

Klasifikacija izmjenjivača topline s obzirom na:

1. Način ostvarivanja kontakta fluida:

- izravni kontakt fluida
- neizravni kontakt fluida

2. Konstrukcijske karakteristike:

- cijevni
- pločasti
- regeneratori

3. Konfiguraciju tokova radnih fluida:

- istosmjerni
- protusmjerni
- križni (unakrsni),

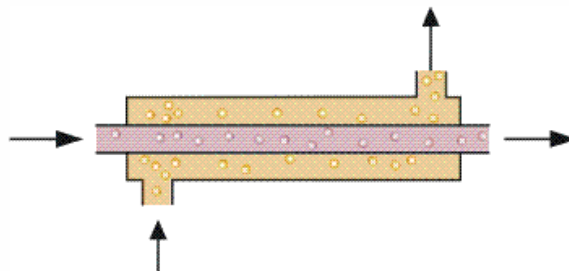
4. Broj prolaza fluida:

- s jednim prolazom fluida
- s više prolaza fluida; [4]

Načelno se izmjenjivači topline mogu podijeliti na rekuperatore, regeneratore i direktne (izravne) aparate, Slika 1.1, od kojih su rekuperatori najzastupljeniji u primjeni.

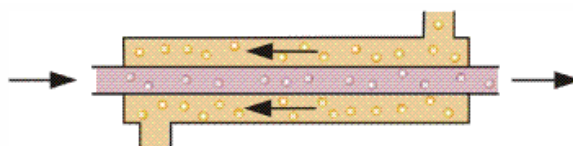
Rekuperatori su izmjenjivači topline kod kojih su struje fluida međusobno razdvojene čvrstom stijenkom koja ne dopušta međusobni izravni dodir struja. Osnovni tipovi rekuperatora dijele se prema međusobnom strujanju fluida kroz rekuperator, a to su; [3]:

- a) Istosmjerni rekuperatori, Slika 1.2., su izmjenjivači topline kod kojih su struje međusobno paralelne i teku u istom smjeru.



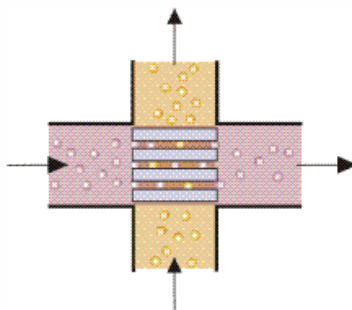
Slika 1.2. Istosmjerni tip rekuperatora; [4]

- b) Protusmjerni rekuperatori, Slika 1.3., su izmjenjivači topline kod kojih struje teku paralelno, ali u suprotnom smjeru. Ova konfiguracija toka radnih fluida omogućuje najveću temperaturnu promjenu oba fluida te je stoga najučinkovitija.



Slika 1.3. Protusmjerni tip rekuperatora; [4]

- c) Križni (unakrsni) rekuperatori, Slika 1.4., su izmjenjivači topline kod kojih se struje fluida međusobno križaju (ukrštaju). Ovakva konfiguracija toka radnih fluida učinkovitija je od izmjenjivača s istosmjernim tokom, ali nije bolja od izmjenjivača s protusmjernim tokom; [3], [4].



Slika 1.4. Križni tip rekuperatora; [4]

Jedan od najčešće viđenih rekuperatora, u praksi, je Shell and Tube izmjenjivač topline različitih izvedbi. Osim osnovnih tipova, nalaze se u praksi i kombinirani rekuperatori s kombinacijom gore navedenih tokova i više prolaza fluida. Jedan od takvih je i lamelni izmjenjivač topline te će se on i Shell and Tube izmjenjivač topline obrađivati dalje u radu.

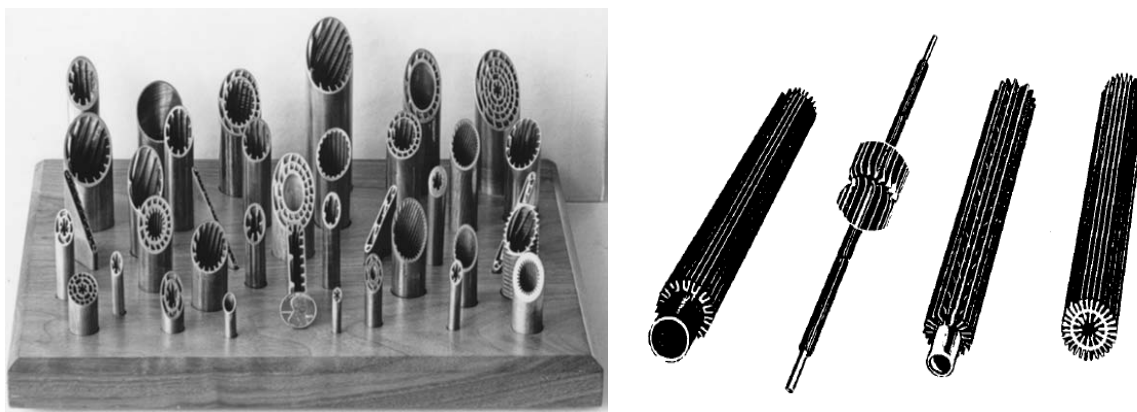
1.2. Lamelni izmjenjivači topline

1.2.1. Općenito

Lamelni izmjenjivači topline su cijevni izmjenjivači topline čije su cijevi obgrljene lamelama koje, povećavajući površinu izmjene topline, omogućuju bolji prijenos topline između dvije struje fluida.

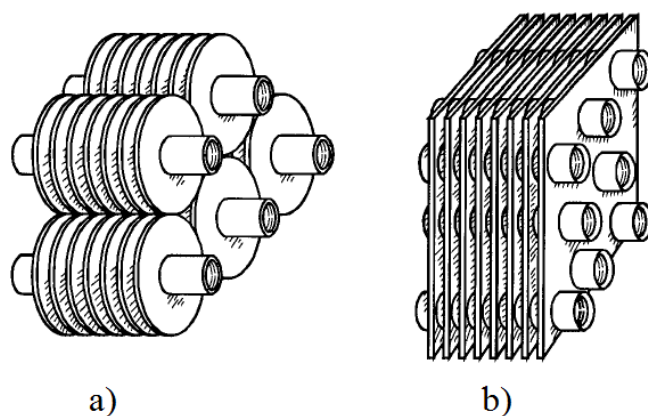
1.2.2. Konstrukcija

Lamele se načelno koriste van cijevi, ali postoje i slučajevi kada se ugrađuju unutar cijevi kao na Sliku 1.5.. Ugrađivanje lamela unutar cijevi se većinom vrši lemljenjem, ljepljenjem, zavarivanjem ili izvlačenjem; [6].



Slika 1.5. a) Primjeri lamela unutar cijevi; b) Primjeri uzdužnih lamela na cijevi; [6]

Postoje dva osnovna tipa lamelnih izmjenjivača topline prikazanih na Slika 1.6.. Na Slika 1.6.a) prikazana je struktura izmjenjivača gdje su cijevi u izmjenjivaču pojedinačno obgrljene lamelama dok je na Slika 1.6.b) izmjenjivač čiji je čitavi snop cijevi obgrljen lamelama; [5].



Slika 1.6. Osnovne strukture lamelnih izmjenjivača topline; [7]

Lamele mogu biti raznih oblika ovisno o konstrukciji i potrebama izmjenjivača te se tako razlikuju valovite, ravne, pravokutne, kružne te uzdužne lamele na pojedinačnim cijevima. Najčešće se u praksi koriste pravokutne i kružne lamele u strukturama prikazanim na Slika 1.6.. Primjer uzdužnih lamela na pojedinačnim cijevim ili tkz. orebrenih cijevi, prikazan je na Slika 1.5.. Uobičajeni broj ravnih lamela po cijevi ili snopu cijevi varira od 250 do 800 lamela/m cijevi s debljinom lamela od 0,08 do 0,25 mm; [6].

1.2.3. Utjecaj na prijenos topline

Lamelni izmjenjivači topline se pretežito koriste za izmjenu topline između plinova i kapljevina. Budući da je koeficijent prijelaza topline na strani plina, izvan cijevi, puno manji od koeficijenta prijelaza topline na strani kapljevine, unutar cijevi, potrebno je povećati

površinu izmjene topline na strani plina kako bi se nadoknadio malen koeficijent prijelaza topline. Povećanjem površine izmjene topline, povećava se vrijednost αA na strani plina, tj. produkt koeficijenta prijelaza topline i površine izmjene topline, a samim time povećava se i izmijenjeni toplinski tok. Površina izmjene topline na strani plina povećava se prethodno navedenim lamelama; [5]; [6]; [7].

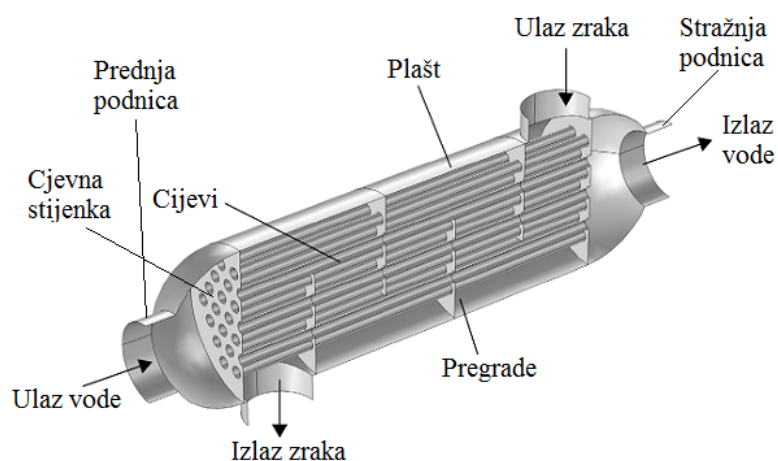
1.2.4. Primjena

Lamelni izmjenjivači topline se, u praksi, koriste kada jedna struja u izmjenjivaču ima puno veći tlak i/ili puno veći koeficijent prijelaza topline od druge struje. Sukladno tome, lamelni izmjenjivači imaju vrlo široku primjenu kao isparivači i kondenzatori u klima jedinicama i jedinicama za zamrzavanje, kao kondenzatori u elektranama te za hlađenje zraka u industrijskim postrojenjima; [6].

1.3. Shell & Tube izmjenjivači topline

1.3.1. Općenito

Shell and Tube izmjenjivači topline se sastoje od snopa cijevi umetnutog u plašt kružnog oblika prema Slika 1.7.. Jedna struja struji kroz cijevi, a druga struji kroz slobodni prostor između cijevi. Načelno se Shell and Tube izmjenjivači proizvode od čelika, ali za posebne primjene, npr. u farmaceutskoj industriji kod upotrebe jakih kiselina, koriste se grafit, plastika i staklo kao proizvodni materijali. Učestala primjena Shell and Tube izmjenjivača u praksi, rezultirala je razvijanjem norme za njihovo označavanje i uporabu, tkz. TEMA (eng. Tubular Exchanger Manufacturers Association) Standard; [1]; [6].

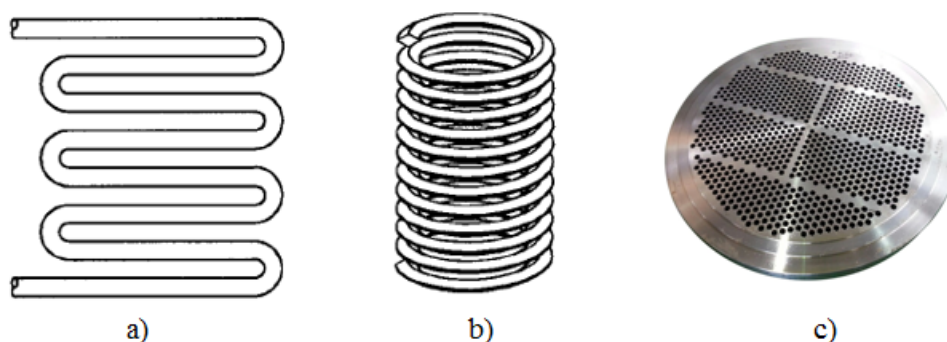


Slika 1.7. Presjek Shell and Tube izmjenjivača topline; [8]

1.3.2. Konstrukcija

Glavni dijelovi Shell and Tube izmjenjivača topline su snop cijevi, prednja i stražnja podnica, pregrade i cjevni stijenke, označeni na Slika 1.7..

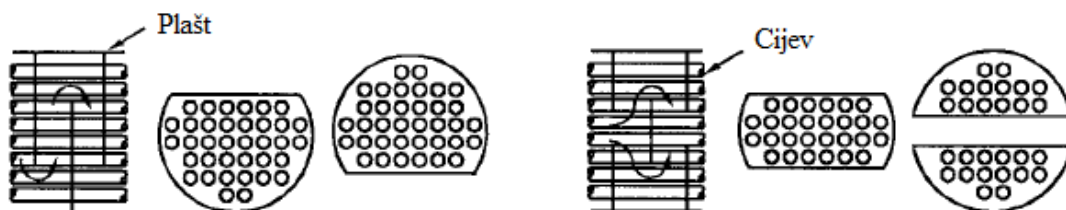
Snop cijevi je uglavnom položen paralelno u odnosu na os plašta izmjenjivača, a cijevi su glatke i okrugle. U nekim slučajevima koriste se i orebrene cijevi, ovisno o konstrukciji i zahtjevima izmjenjivača. Osim paralelno -položenih okruglih cijevi, ponekad se koriste cijevi zmijolikog ili spiralnog oblika prikazanih na Slika 1.8..



Slika 1.8. a) Zmijoliki oblik cijevi; b) Spiralni oblik cijevi; c) Cjevna stijenka; [6]

Fluid koji struji kroz cijevi unutar izmjenjivača, ulazi i izlazi kroz prednju i stražnju podnicu. Prednja podnica je fiksirana, a stražnja može biti fiksirana ili pomična, ovisno o toplinskim naprezanjima između cijevi i plašta izmjenjivača. Glavni kriteriji odabira prednje i stražnje podnice su cijena, održavanje, sigurnost od miješanja radnih fluida te toplinska naprezanja.

Tok struje van cijevi, tj. u plaštu, varira od najjednostavnijih slučajeva, gdje je tok usmjeren u smjeru ili suprotno od toka struje u cijevi, do kombiniranog toka, ovisno o konstrukciji izmjenjivača. Usmjeravanje toka struje van cijevi vrše pregrade koje se postavljaju tako da se dobije željena konfiguraciju toka prema zahtjevima izmjenjivača. Primjeri nekih pregrada i tokova prikazani su na Slika 1.9..



Slika 1.9. Primjeri pregrada u Shell and Tube izmjenjivaču topline; [6]

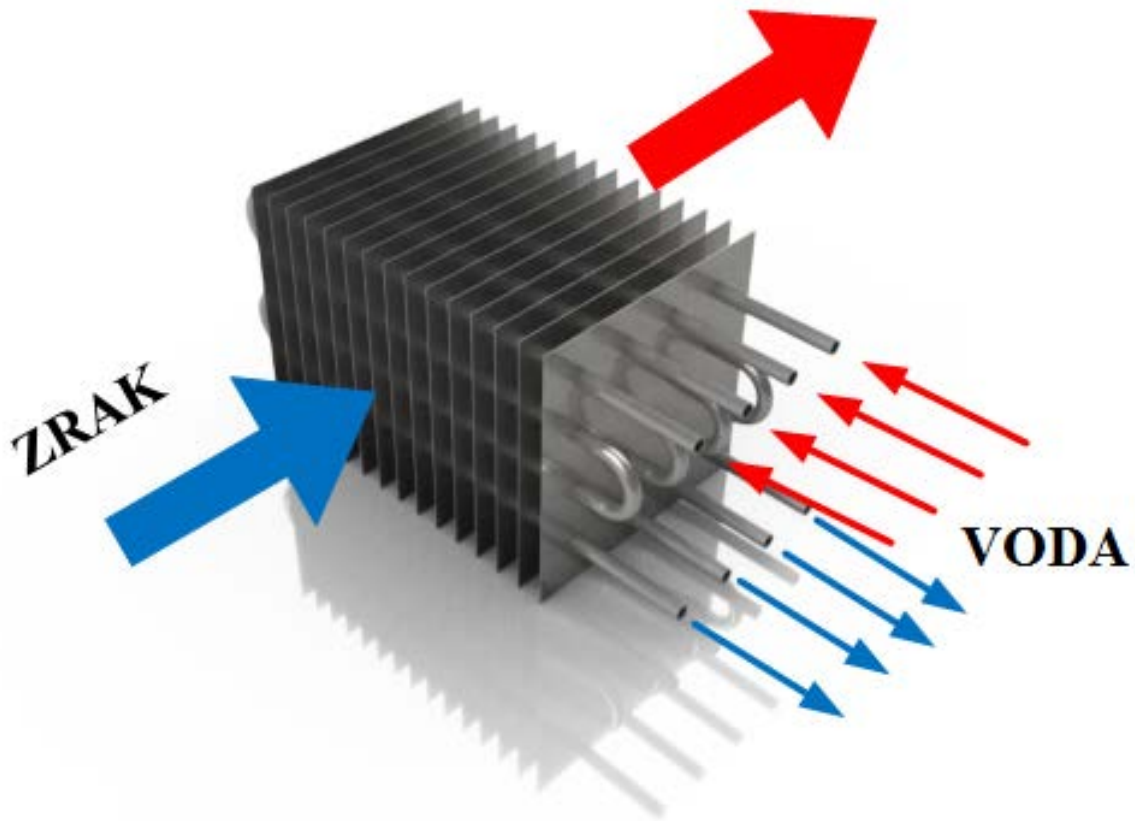
Na krajevima izmjenjivača, nalaze se cjevne stijenke, tj. okrugle metalne ploče s izbušenim rupama koje odgovaraju snopu cijevi unutar izmjenjivača te služe za držanje cijevi. Primjer cjevne stijenke prikazan je na Slika 1.8.; [6].

1.3.3. Primjena

Shell and Tube izmjenjivači topline jedni su od najčešće korištenih izmjenjivača topline u praksi. Imaju vrlo široku primjenu u naftno – prerađivačkoj i kemijskoj industriji, kao generatori pare, kondenzatori i zagrijači napojne vode u termoenergetskim postrojenjima, kao isparivači i kondenzatori u klima jedinicama te u nuklearnim postrojenjima; [6]; [7].

2. ODREĐIVANJE POVRŠINE LAMELNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE

Potrebno je pomoću zadanih parametara izračunati površinu lamelnog izmjenjivača topline, točnije broj lamela i duljinu izmjenjivača, kako bi se zadovoljio zadani toplinski učin u slučaju kada je tok ogrjevnog medija u susjednim prolazima protusmjernan. Konstrukcija izmjenjivača u ovom slučaju je prikazana na Slika 2.1.



Slika 2.1. Konstrukcija zadanog izmjenjivača topline

Slijedi primjer proračuna lamelnog izmjenjivača topline.

2.1. Konstrukcijski proračun

Izmjenjivač se sastoji od četiri cijevi izrađene od nehrđajućeg čelika (St. 1.4301) s četiri prolaza ma cijevnoj strani. Oko cijevi se nalaze pravokutne lamele izrađene od aluminija.

Zadani su sljedeći parametri:

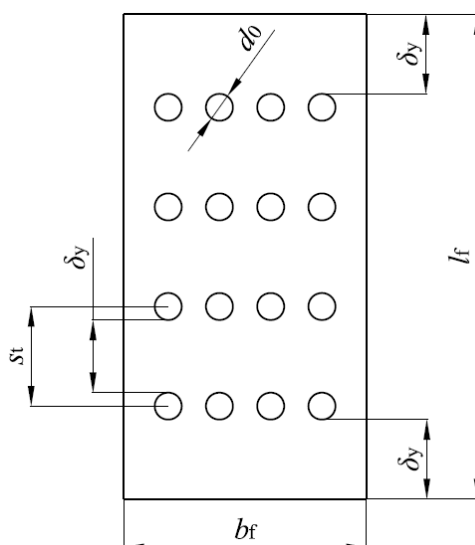
Tablica 2.1. Parametri cijevi

Broj cijevi, n_c	[-]	4
Broj cjevnih prolaza, n_p	[-]	4
Ukupan broj cijevi unutar izmjenjivača, n_{uk}	[-]	16
Vanjski promjer cijevi, d_0	[mm]	16,7
Debljina stijenke cijevi, δ_c	[mm]	1
Toplinska provodnost cijevi, λ_c	[W/(m K)]	45,4

Tablica 2.2. Parametri lamela

Duljina lamela, l_f	[mm]	600
Širina lamela, b_f	[mm]	300
Debljina lamela, δ_f	[mm]	0,18
Slobodni razmak između lamela, a_f	[mm]	2
Toplinska provodnost lamela, λ_f	[W/(m K)]	207

Neke od karakterističnih veličina su prikazane na Slika 2.2.



Slika 2.2. Presjek lamele u izmjenjivaču

Kako bi se moglo krenuti u proračun, pretpostavljena je duljina cijevi, l [m], u iznosu od 0,5 m. Sa svim ostalim zadanim parametrima lamela i cijevi slijedi konstrukcijski proračun.

Razmak između gornjih površina lamela se računa prema izrazu:

$$s = a_f + \delta_f = 2 + 0,18 = 2,18 \text{ mm}, \quad (2.1.)$$

gdje su:

a_f - slobodni razmak između lamela, [mm]

δ_f - debljina lamela, [mm]

Udaljenost od ruba do ruba cijevi u vertikalnom smjeru prema Slika 2.2. iznosi:

$$\delta_y = \frac{l_f - n_c \cdot d_0}{n_c + 1} = \frac{600 - 4 \cdot 16,7}{4 + 1} = 106,64 \text{ mm}, \quad (2.2.)$$

gdje su:

l_f - duljina lamela, [mm]

n_c - broj cijevi, [-]

d_0 - vanjski promjer cijevi, [mm]

Udaljenost od središnje osi jedne cijevi do središnje osi druge cijevi, prema Slika 2.2, se računa:

$$s_t = \delta_y + d_0 = 106,64 + 16,7 = 123,34 \text{ mm}, \quad (2.3.)$$

Zrak ulazi u izmjenjivač okomito na cijevi i to tako da zrak nastrujava na dulju stranicu lamele, l_f [mm]. Struja zraka koji ulazi među lamele i cijevi te struja vode u cijevima se križaju, tj. radi se o izmjenjivaču topline s križnim tokom.

Slijedi izračun karakterističnih površina potrebnih za daljnji proračun:

Površina između dvije lamele kroz koju struji zrak, prije cijevi:

$$A_0 = s_t \cdot s = 123,34 \cdot 2,18 = 268,88 \text{ mm}^2, \quad (2.4.)$$

Površina između dvije lamele i cijevi kroz koju struji zrak:

$$A_s = \delta_y \cdot s = 106,64 \cdot 2,18 = 232,48 \text{ mm}^2, \quad (2.5.)$$

Površina jedne lamele:

$$\begin{aligned} A_{sf} &= 2 \cdot \left(b_f \cdot l_f - n_{uk} \cdot \frac{d_0^2 \pi}{4} \right) = 2 \cdot \left(300 \cdot 600 - 16 \cdot \frac{16,7^2 \pi}{4} \right) \\ &= 35,299 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \end{aligned} \quad (2.6.)$$

Broj lamela za pretpostavljenu duljinu cijevi:

$$n_f = \frac{l}{s} = \frac{500}{2,18} = 229,358 \approx 230, \quad (2.7.)$$

Površina lamele po jednoj cijevi:

$$A_{ft} = \frac{n_f \cdot A_{sf}}{n_{uk}} = \frac{230 \cdot 35,299 \cdot 10^{-2}}{16} = 5,074 \text{ m}^2, \quad (2.8.)$$

Površina cijevi uzimajući u obzir i lamele:

$$A_t = d_0 \cdot \pi \cdot a_f \cdot (n_f + 1) = 16,7 \cdot \pi \cdot 2 \cdot (230 + 1) = 2,424 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad (2.9.)$$

Površina cijevi bez lamela za pretpostavljenu duljinu cijevi:

$$A_{t0} = d_0 \cdot \pi \cdot l = 16,7 \cdot \pi \cdot 500 = 2,623 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad (2.10.)$$

Površina izmjene topline po jednoj cijevi:

$$A = A_{ft} + A_t = 5,074 + 2,424 \cdot 10^{-2} = 5,098 \text{ m}^2, \quad (2.11.)$$

Ukupna površina izmjene topline u izmjenjivaču:

$$A_{uk} = n_{uk} \cdot A = 16 \cdot 5,098 = 81,568 \text{ m}^2, \quad (2.12.)$$

Unutarnja površina cijevi za pretpostavljenu duljinu:

$$A_i = d_i \cdot \pi \cdot l = 14,7 \cdot \pi \cdot 500 = 2,309 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad (2.13.)$$

gdje je:

$$d_i = d_0 - 2\delta_c = 14,7 \text{ mm} - \text{unutarnji promjer cijevi}$$

2.2. Termodinamički proračun

Kroz cijevi izmjenjivača struji voda koja predaje toplinski tok, preko stijenki cijevi i lamela, zraku koji ulazi među lamele i poprečno nastrujava na cijevi. Zagrijani zrak izlazi na drugom kraju izmjenjivača van, a hladnija voda se nakon četiri prolaza kroz izmjenjivač vraća u spremnik napojne vode i ponovno zagrijava. Smjerovi strujanja zraka i vode prikazani su na Slika 2.1..

Zadani su parametri vode i zraka u tablicama:

Tablica 2.3. Parametri zraka

Volumni protok zraka, $q_{v,zr}$	[m ³ /h]	2400
Tlak zraka, p_{zr}	[bar]	1
Ulazna temperatura zraka, ϑ_{zr}'	[°C]	8
Izlazna temperatura zraka, ϑ_{zr}''	[°C]	25

Tablica 2.4. Parametri vode

Volumni protok vode, $q_{v,w}$	[l/s]	0,175
Ulazna temperatura vode, ϑ_w'	[°C]	140

Uz zadane parametre, za daljnji proračun potrebna su i svojstva zraka i vode koja se očitavaju iz Toplinskih tablica; [9]. Svojstva zraka se očitavaju za srednju temperaturu zraka koja iznosi:

$$\vartheta_{m,zr} = \frac{\vartheta'_{zr} + \vartheta''_{zr}}{2} = 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

a svojstva vode za zadanu ulaznu temperaturu vode koja iznosi:

$$\vartheta'_w = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tablica 2.5. Svojstva zraka pri $\vartheta_{m,zr} = 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

ρ_{zr}	1,2031	[kg/m ³]
$c_{p,zr}$	1,005825	[kJ/(kg K)]
μ_{zr}	$1,8037 \cdot 10^{-5}$	[Pa s]
ν_{zr}	$1,4992 \cdot 10^{-5}$	[m ² /s]
λ_{zr}	0,0253	[W/(m K)]

Tablica 2.6. Svojstva vode pri $\vartheta'_w = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$

ρ_w	926,18	[kg/m ³]
$c_{p,w}$	4,286	[kJ/(kg K)]
μ_w	$1,9654 \cdot 10^{-4}$	[Pa s]
ν_w	$2,1221 \cdot 10^{-7}$	[m ² /s]
λ_w	0,6833	[W/(m K)]

Uz očitana svojstva, zadane parametre i prethodno izračunate podatke, kreće se u termodinamički proračun uz sljedeće pretpostavke:

- stacionarno strujanje fluida - pretpostavlja se da fluidi protječu konstantnom brzinom pri konstantnom tlaku
- radni fluidi u izmjenjivaču smatraju se idealnim fluidima
- toplinski gubici se ne uzimaju u obzir
- toplinski kapaciteti radnih fluida se smatraju konstantnima

Kod izmjenjivača s križnim tokom strujanja, indeks 1 se daje struji unutar cijevi, tj. u ovom slučaju struja vode je jača struja, a indeks 2 se daje struji izvan cijevi, tj. u ovom izmjenjivaču struja zraka je slabija struja.

Iz zadane temperaturne razlike struje zraka te volumnog protoka zraka, računa se toplinski tok koji voda predaje zraku:

$$\begin{aligned}\phi &= C_2 \cdot \Delta\vartheta_2 = q_{m,zr} \cdot c_{p,zr} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') = \rho_{zr} \cdot q_{v,zr} \cdot c_{p,zr} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') \\ &= 1,2031 \cdot \frac{2400}{3600} \cdot 1,005825 \cdot 10^3 \cdot (25 - 8) = 13,715 \text{ kW},\end{aligned}\quad (2.14.)$$

gdje su:

C_2 - toplinski kapacitet zraka, [W/K]

$q_{m,zr}$ - maseni protok zraka, [kg/s]

$c_{p,zr}$ - specifični toplinski kapacitet zraka, [J/(kg K)]

ρ_{zr} - gustoća zraka, [kg/m³]

Budući da je zadana ulazna temperatura vode i njen maseni protok, može se odmah izračunati izlazna temperatura vode:

$$\begin{aligned}\vartheta_1'' &= \vartheta_1' - \frac{\phi}{C_1} = \vartheta_1' - \frac{\phi}{q_{m,w} \cdot c_{p,w}} = \vartheta_1' - \frac{\phi}{\rho_w \cdot q_{v,w} \cdot c_{p,w}} \\ &= 140 - \frac{13,715}{926,18 \cdot 0,175 \cdot 10^{-3} \cdot 4,286} = 120,257 \text{ °C},\end{aligned}\quad (2.15.)$$

gdje su:

C_1 - toplinski kapacitet vode, [W/K]

$q_{m,w}$ - maseni protok vode, [kg/s]

ρ_w - gustoća vode, [kg/m³]

$c_{p,w}$ - specifični toplinski kapacitet vode, [J/(kg K)]

Iz ulazne i izlazne temperature vode, slijedi temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču:

$$\Delta\vartheta_1 = \vartheta_1' - \vartheta_1'' = 140 - 120,257 = 19,743 \text{ °C} \quad (2.16.)$$

Pomoću $\Delta\vartheta_1$, na kraju proračuna, dobit će se stvarna duljina cijevi u izmjenjivaču, tj. duljina izmjenjivača.

2.2.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

Za izračun koeficijenta prijelaza topline na strani zraka, potrebna je kritična brzina zraka, najveća brzina koja struji kroz površinu A_s . Kritična brzina se računa iz sljedećeg odnosa:

$$w_s = w_0 \cdot \frac{A_0}{A_s}, \quad \text{m/s}, \quad (2.17.)$$

gdje je:

w_0 - brzina zraka između lamela prije cijevi, [m/s]

Brzina w_0 se dobiva iz volumnog protoka zraka prema izrazu:

$$w_0 = \frac{q_{v,zr}}{A_{0,uk}}, \quad \text{m/s}, \quad (2.18.)$$

gdje je:

$A_{0,uk}$ - ukupna površina između dvije lamele kroz koju struji zrak prije cijevi, [m²]

Površina $A_{0,uk}$ za pretpostavljenu duljinu cijevi se računa prema:

$$A_{0,uk} = l_f \cdot (l - n_f \cdot \delta_f) = 600 \cdot (500 - 230 \cdot 0,18) = 27,516 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \quad (2.19.)$$

Uvrštavanjem dobivene površine u jednadžbu 2.18., dobiva se brzina w_0 :

$$w_0 = \frac{2400}{3600} \div (27,516 \cdot 10^{-2}) = 2,423 \text{ m/s},$$

S dobivenom brzinom, računa se kritična brzina w_s prema jednadžbi 2.17.:

$$w_s = 2,423 \cdot \frac{268,88}{232,48} = 2,802 \text{ m/s}$$

Za izračun ukupnog koeficijenta prijelaza topline za cijevi u lamelnom izmjenjivaču topline, prvo se mora izračunati koeficijent prijelaza u slučaju nastrojavanja tekućine na snop cijevi, ne uzimajući u obzir lamele. Reynoldsov broj se dobiva iz izraza:

$$Re = \frac{w_s \cdot d_0}{\nu_{zr}} = \frac{2,802 \cdot 0,0167}{1,4992 \cdot 10^{-5}} = 3121,225 \quad (2.20.)$$

gdje je:

ν_{zr} - kinematička viskoznost zraka [m²/s]

Prandtllov broj se računa prema izrazu:

$$Pr = \frac{\mu_{zr} \cdot c_{p,zr}}{\lambda_{zr}} = \frac{1,8037 \cdot 10^{-5} \cdot 1,005825 \cdot 10^3}{0,0253} = 0,717 \quad (2.21.)$$

gdje je:

μ_{zr} - dinamička viskoznost zraka [Pa s]

λ_{zr} - toplinska provodnost zraka [W/(m K)]

Budući da je $Re > 2300$, radi se o turbulentnom strujanju zraka te se Nusseltov broj računa prema sljedećem izrazu:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,22 \cdot Re^{0,6} \left(\frac{A}{A_{t0}} \right)^{-0,15} \cdot Pr^{1/3} \\ &= 0,22 \cdot 3121,225^{0,6} \cdot \left(\frac{5,098}{2,623 \cdot 10^{-2}} \right)^{-0,15} \cdot 0,717^{1/3} = 11,158 \end{aligned} \quad (2.22.)$$

Koeficijent prijelaza topline u slučaju nastrojavanja zraka na snop cijevi, ne uzimajući u obzir lamele proizlazi iz:

$$\alpha_m = \frac{Nu \cdot \lambda_{zr}}{d_0} = \frac{11,158 \cdot 0,0253}{0,0167} = 16,904 \quad \frac{W}{m^2 K} \quad (2.23.)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani zraka, uzimajući u obzir i lamele, tzv. virtualni koeficijent prijelaza topline, računa se pomoću vrijednosti iskoristivosti lamela, η_f , do koje se dolazi izračunavanjem sljedećih vrijednosti:

$$\varphi' = 1,28 \cdot \frac{b_f}{d_0} \cdot \sqrt{\frac{l_f}{b_f} - 0,2} = 1,28 \cdot \frac{300}{16,7} \cdot \sqrt{\frac{600}{300} - 0,2} = 30,85 \quad (2.24.)$$

iz čega slijedi:

$$\begin{aligned} \varphi_{uk} &= (\varphi' - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln \varphi') = (30,85 - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln 30,85) \\ &= 65,676 \end{aligned} \quad (2.25.)$$

te za jednu cijev vrijedi:

$$\varphi = \frac{\varphi_{uk}}{n_{uk}} = \frac{65,676}{16} = 4,105 \quad (2.26.)$$

Operator X se računa prema izrazu:

$$X = \varphi \cdot \frac{d_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_m}{\lambda_f \cdot \delta_f}} = 4,105 \cdot \frac{0,0167}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 16,904}{207 \cdot 0,00018}} = 1,0325 \quad (2.27.)$$

Pomoću operatora X , dobiva se iskoristivost lamela kod pretpostavljene duljine cijevi:

$$\eta_f = \frac{\tanh X}{X} = \frac{\tanh(1,0325)}{1,0325} = 0,7505 = 75,05 \% \quad (2.28.)$$

Uvrštavanjem iskoristivosti lamela u izraz za virtualni koeficijent prijelaza topline, α_v , dobiva se:

$$\begin{aligned} \alpha_v &= \alpha_m \cdot \left[1 - (1 - \eta_f) \cdot \frac{A_{ft}}{A} \right] = 16,904 \cdot \left[1 - (1 - 0,7505) \cdot \frac{5,074}{5,098} \right] \\ &= 12,706 \frac{W}{m^2 K} \end{aligned} \quad (2.29.)$$

2.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani vode

Tok vode se promatra kao strujanje fluida kroz cijev određenog promjera te se za taj slučaj računa i koeficijent prijelaza prema izrazima iz VDI Heat Atlasa; [10]. Za proračun koeficijenta prijelaza topline na strani vode, potrebna je vrijednost brzine vode koja struji kroz cijevi, a računa se prema izrazu:

$$w_w = \frac{q_{v,w}}{A_{1,uk}}, \quad \text{m/s} \quad (2.30.)$$

gdje je:

$A_{1,uk}$ - ukupna površina poprečnih presjeka svih cijevi, $[\text{m}^2]$

Površina $A_{1,uk}$ se računa prema izrazu:

$$A_{1,uk} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot n_c = \frac{0,0147^2 \cdot \pi}{4} \cdot 4 = 6,789 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \quad (2.31.)$$

gdje su:

d_i - unutarnji promjer cijevi $[\text{m}]$

n_c - broj cijevi kroz koje ulazi vode u izmjenjivač $[-]$

Budući da je protok vode poznat, uvrštavanjem dobivene površine u jednadžbu 2.30., dobiva se brzina vode unutar cijevi:

$$w_w = \frac{0,175 \cdot 10^{-3}}{6,789 \cdot 10^{-4}} = 0,2578 \text{ m/s},$$

S dobivenom brzinom vode, može se izračunati Reynoldsov broj strujanja vode u cijevi:

$$Re = \frac{w_w \cdot d_i}{\nu_w} = \frac{0,2578 \cdot 0,0147}{2,1221 \cdot 10^{-7}} = 17858,1 \quad (2.32.)$$

gdje je:

ν_w - kinematička viskoznost vode $[\text{m}^2/\text{s}]$

Prandtlov broj se računa prema izrazu:

$$Pr = \frac{\mu_w \cdot c_{p,w}}{\lambda_w} = \frac{1,9654 \cdot 10^{-4} \cdot 4,286 \cdot 10^3}{0,6833} = 1,2328 \quad (2.33.)$$

Budući da je $Re > 2300$, voda struji turbulentno te se Nusseltov broj računa prema sljedećem izrazu:

$$Nu = \frac{\frac{\zeta}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{l} \right)^{2/3} \right], \quad (2.34.)$$

gdje je:

$$\zeta = (1,8 \cdot \log_{10} Re - 1,5)^{-2} = (1,8 \cdot \log_{10} 17858,1 - 1,5)^{-2} = 0,0264 \quad (2.35.)$$

Uvrštavanjem dobivenog parametra, ζ , u jednadžbu 2.34., dobiva se Nusseltov broj za turbulentno strujanje vode u cijevi:

$$Nu = \frac{\frac{0,0264}{8} \cdot 17858,1 \cdot 1,2328}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{0,0264}{8}} \cdot (1,2328^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,0147}{0,5} \right)^{2/3} \right] = 71,866$$

S dobivenim Nusseltovim brojem, sada se može izračunati koeficijent prijelaza topline na strani vode, α_i :

$$\alpha_i = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_i} = \frac{71,866 \cdot 0,6833}{0,0147} = 3340,547 \quad \frac{W}{m^2 K} \quad (2.36.)$$

2.2.3. Koeficijent prolaza lamelnog izmjenjivača topline

S izračunatim vrijednostima koeficijenata prijelaza topline na strani zraka i na strani vode, može se izračunati ukupni koeficijent prolaza topline za lamelni izmjenjivač topline. Ukupni koeficijent prolaza topline za lamelni izmjenjivač topline se računa prema sljedećem izrazu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{A}{A_i} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{2 \cdot \delta_c}{2 \cdot \lambda_t} \right)} \quad (2.37.)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{12,706} + \frac{5,098}{2,309 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{1}{3340,547} + \frac{2 \cdot 0,001}{2 \cdot 45,4} \right)} = 6,682 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

gdje su:

δ_c - debljina stijenke cijevi, [m]

λ_t - toplinska provodnost cijevi, [W/(m K)]

2.3. Utjecaj cjevnih prolaza

Utjecaj cjevnih prolaza u izmjenjivaču se uzima u obzir preko korekcijskog faktora F . Korekcijski faktor F je proračunat (analitički i numerički) i dan u literaturi; [10] kao funkcija bezdimenzijskih značajki R i NTU . Izraz korekcijskog faktora F za protusmjerno strujanje ogrjevnog medija u susjednim prolazima glasi:

$$F = \frac{n}{NTU_1 \cdot \sqrt{R_1}} \cdot \frac{3 \sinh\left(\frac{NTU_1}{n} \sqrt{R_1}\right)}{1 + 2 \cosh\left(\frac{NTU_1}{n} \sqrt{R_1}\right)}, \quad (2.38.)$$

gdje su:

n - broj cjevnih prolaza, [-]

R_1 - omjer toplinskih kapaciteta struja u izmjenjivaču [-]

NTU_1 - broj prijenosnih jedinica [-]

Omjer toplinskih kapaciteta struja u izmjenjivaču se računa prema izrazu:

$$R_1 = \frac{C_1}{C_2} = \frac{694,681}{806,739} = 0,8611 \quad (2.39.)$$

Broj prijenosnih jedinica (eng. Number of transfer units) se dobiva iz:

$$NTU_1 = \frac{k \cdot A_{uk}}{C_1} = \frac{6,682 \cdot 81,568}{694,681} = 0,7846 \quad (2.40.)$$

Uvrštavanjem NTU_1 i R_1 u jednadžbu 2.38., dobiva se korekcijski faktor F za protusmjerno strujanje ogrjevnog medija u susjednim prolazima za ovaj izmjenjivač:

$$F = \frac{4}{0,7846 \cdot \sqrt{0,8611}} \cdot \frac{3 \sinh\left(\frac{0,7846}{4} \sqrt{0,8611}\right)}{1 + 2 \cosh\left(\frac{0,7846}{4} \sqrt{0,8611}\right)} = 0,9945$$

S dobivenim korekcijskim faktorom F , može se izračunati bezdimenzijska značajka temperaturne promjene, P_1 , prema izrazu:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1 - \exp[(R_1 - 1) \cdot NTU_1 \cdot F]}{1 - R_1 \cdot \exp[(R_1 - 1) \cdot NTU_1 \cdot F]} \\ &= \frac{1 - \exp[(0,8611 - 1) \cdot 0,7846 \cdot 0,9945]}{1 - 0,8611 \cdot \exp[(0,8611 - 1) \cdot 0,7846 \cdot 0,9945]} = 0,4518 \end{aligned} \quad (2.41.)$$

Iz bezdimenzijske značajke temperaturne promjene, P_1 , dobiva se izlazna temperatura vode za pretpostavljenu duljinu cijevi, l , prema izrazu:

$$\vartheta_1'' = \vartheta_1' - P_1 \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_2') = 140 - 0,4518 \cdot (140 - 8) = 80,362 \text{ °C} \quad (2.42.)$$

Temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču s pretpostavljenom duljinom cijevi iznosi:

$$\Delta\vartheta_1^* = \vartheta_1' - \vartheta_1'' = 140 - 80,362 = 59,638 \text{ °C} \quad (2.43.)$$

Iz jednadžbe 2.16. vidljivo je da temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču iznosi $\Delta\vartheta_1 = 19,743 \text{ °C}$ te prema dobivenom $\Delta\vartheta_1^*$ u jednadžbi 2.43., zaključuje se kako pretpostavljena duljina cijevi nije dobra. Kako bi se pronašla valjana duljina cijevi koja bi davala $\Delta\vartheta_1^* = 19,743 \text{ °C}$, u Microsoft Excelu koristi se funkcija Goal Seek pomoću koje se pronalazi duljina cijevi l^* koja zadovoljava taj uvjet. Ta duljina iznosi:

$$l^* = 0,08 \text{ m} = 8 \text{ cm}, \quad (2.44.)$$

a pripadajući broj lamela iznosi:

$$n_f^* = 37 \quad (2.45.)$$

3. USPOREDBA POVRŠINA IZMJENJIVAČA TOPLINE

Nakon provedenog proračuna za lamelni izmjenjivač topline, u ovom poglavlju će se za pet puta veću protočnu količinu zraka kroz izmjenjivač, proračunavati duljina lamelnog izmjenjivača topline u slučaju kada je tok ogrjevnog medija u susjednim prolazima istosmjernan i protusmjernan te Shell and Tube izmjenjivača topline.

Zadani parametri su:

Tablica 3.1. Parametri zraka

Volumni protok zraka, $q_{v,zr}$	[m ³ /h]	12 000
Tlak zraka, p_{zr}	[bar]	1
Ulazna temperatura zraka, ϑ_{zr}'	[°C]	8
Izlazna temperatura zraka, ϑ_{zr}''	[°C]	25

Tablica 3.2. Parametri vode

Volumni protok vode, $q_{v,w}$	[l/s]	0,175
Ulazna temperatura vode, ϑ_w'	[°C]	140

3.1. Lamelni izmjenjivač topline s protusmjernim strujanjem ogrjevnog medija

Potrebno je pomoću zadanih parametara izračunati površinu lamelnog izmjenjivača topline, točnije broj lamela i duljinu izmjenjivača, kako bi se zadovoljio zadani toplinski učin u slučaju kada je tok ogrjevnog medija u susjednim prolazima protusmjernan.

3.1.1. Konstrukcijski proračun

Izmjenjivač se sastoji od četiri cijevi izrađene od nehrđajućeg čelika (St. 1.4301) s četiri prolaza ma cijevnoj strani. Oko cijevi se nalaze pravokutne lamele izrađene od aluminija.

Pretpostavljaju se iste geometrijske karakteristike izmjenjivača kao i u 2. poglavlju. Sukladno tome, sve karakteristične površine i udaljenosti su jednake onima dobivenima u 2.1. poglavlju te će ih se samo navesti prije daljnjeg proračuna.

Pretpostavljena duljina cijevi:

$$l = 0,5 \text{ m}, \quad (3.1.)$$

Razmak između gornjih površina lamela:

$$s = 2,18 \text{ mm}, \quad (3.2.)$$

Udaljenost od ruba do ruba cijevi u vertikalnom smjeru:

$$\delta_y = 106,64 \text{ mm}, \quad (3.3.)$$

Udaljenost od središnje osi jedne cijevi do središnje osi druge cijevi:

$$s_t = 123,34 \text{ mm}, \quad (3.4.)$$

Površina između dvije lamele kroz koju struji zrak, prije cijevi:

$$A_0 = 268,88 \text{ mm}^2, \quad (3.5.)$$

Površina između dvije lamele i cijevi kroz koju struji zrak:

$$A_s = 232,48 \text{ mm}^2, \quad (3.6.)$$

Površina jedne lamele:

$$A_{sf} = 35,299 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad (3.7.)$$

Broj lamela za pretpostavljenu duljinu cijevi:

$$n_f = 229,358 \approx 230, \quad (3.8.)$$

Površina lamele po jednoj cijevi:

$$A_{ft} = 5,074 \text{ m}^2, \quad (3.9.)$$

Površina cijevi uzimajući u obzir i lamele:

$$A_t = 2,424 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad (3.10.)$$

Površina cijevi bez lamela za pretpostavljenu duljinu cijevi:

$$A_{t0} = 2,623 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad (3.11.)$$

Površina izmjene topline po jednoj cijevi:

$$A = 5,098 \text{ m}^2, \quad (3.12.)$$

Ukupna površina izmjene topline u izmjenjivaču:

$$A_{uk} = 81,568 \text{ m}^2, \quad (3.13.)$$

Unutarnja površina cijevi za pretpostavljenu duljinu:

$$A_i = 2,309 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad (3.14.)$$

3.1.2. Termodinamički proračun

Kroz cijevi izmjenjivača struji voda koja predaje toplinski tok, preko stijenki cijevi i lamela, zraku koji ulazi među lamele i poprečno nastrujava na cijevi. Zagrijani zrak izlazi na drugom kraju izmjenjivača van, a hladnija voda se nakon četiri prolaza kroz izmjenjivač vraća u spremnik napojne vode i ponovno zagrijava. Budući da su temperaturne razlike struja identične onima u 2. poglavlju, svojstva zraka i vode se uzimaju za iste temperature i identična su onima iz 2.2. poglavlja.

Tablica 3.3. Svojstva zraka pri $\vartheta_{m,zr} = 16,5$ [°C]

ρ_{zr}	1,2031	[kg/m ³]
$c_{p,zr}$	1,005825	[kJ/(kg K)]
μ_{zr}	$1,8037 \cdot 10^{-5}$	[Pa s]
ν_{zr}	$1,4992 \cdot 10^{-5}$	[m ² /s]
λ_{zr}	0,0253	[W/(m K)]

Tablica 3.4. Svojstva vode pri $\vartheta_w' = 140$ [°C]

ρ_w	926,18	[kg/m ³]
$c_{p,w}$	4,286	[kJ/(kg K)]
μ_w	$1,9654 \cdot 10^{-4}$	[Pa s]
ν_w	$2,1221 \cdot 10^{-7}$	[m ² /s]
λ_w	0,6833	[W/(m K)]

I u ovom slučaju, jača struja je u cijevi, tj. voda dobiva indeks 1, a slabija struja struji među lamelama i cijevi, tj. zrak dobiva indeks 2. Uz očitana svojstva, zadane parametre i prethodno izračunate podatke, slijedi termodinamički proračun:

Iz zadane temperaturne razlike struje zraka te pet puta većeg volumnog protoka zraka, računa se toplinski tok koji voda predaje zraku:

$$\begin{aligned}\phi &= C_2 \cdot \Delta\vartheta_2 = q_{m,zr} \cdot c_{p,zr} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') = \rho_{zr} \cdot q_{v,zr} \cdot c_{p,zr} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') \\ &= 1,2031 \cdot \frac{12000}{3600} \cdot 1,005825 \cdot 10^3 \cdot (25 - 8) = 68,5728 \text{ kW},\end{aligned}\quad (3.15.)$$

Budući da je zadana ulazna temperatura vode i njen maseni protok, može se odmah izračunati izlazna temperatura vode:

$$\begin{aligned}\vartheta_1'' &= \vartheta_1' - \frac{\phi}{C_1} = \vartheta_1' - \frac{\phi}{q_{m,w} \cdot c_{p,w}} = \vartheta_1' - \frac{\phi}{\rho_w \cdot q_{v,w} \cdot c_{p,w}} \\ &= 140 - \frac{68,5728}{926,18 \cdot 0,175 \cdot 10^{-3} \cdot 4,286} = 41,289 \text{ } ^\circ\text{C},\end{aligned}\quad (3.16.)$$

Iz ulazne i izlazne temperature vode, slijedi temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču:

$$\Delta\vartheta_1 = \vartheta_1' - \vartheta_1'' = 140 - 41,289 = 98,711 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.17.)$$

Pomoću $\Delta\vartheta_1$, na kraju proračuna, dobit će se stvarna duljina cijevi u izmjenjivaču, tj. duljina izmjenjivača.

3.1.2.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

Za izračun koeficijenta prijelaza topline na strani zraka, potrebna je kritična brzina zraka, najveća brzina koja struji kroz površinu A_s . Kritična brzina se računa iz sljedećeg odnosa:

$$w_s = w_0 \cdot \frac{A_0}{A_s}, \quad \text{m/s}, \quad (3.18.)$$

gdje je:

w_0 - brzina zraka između lamela prije cijevi, [m/s]

Brzina w_0 se dobiva iz volumnog protoka zraka prema izrazu:

$$w_0 = \frac{q_{v,zr}}{A_{0,uk}}, \quad \text{m/s}, \quad (3.19.)$$

gdje je:

$A_{0,uk}$ - ukupna površina između dvije lamele kroz koju struji zrak prije cijevi, $[\text{m}^2]$

Površina $A_{0,uk}$ za pretpostavljenu duljinu cijevi identična je onoj iz 2.2.1. poglavlja i računa se prema:

$$A_{0,uk} = l_f \cdot (l - n_f \cdot \delta_f) = 600 \cdot (500 - 230 \cdot 0,18) = 27,516 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \quad (3.20.)$$

Uvrštavanjem dobivene površine u jednadžbu 3.19., dobiva se brzina w_0 :

$$w_0 = \frac{12000}{3600} \div (27,516 \cdot 10^{-2}) = 12,114 \text{ m/s},$$

S dobivenom brzinom, računa se kritična brzina w_s prema jednadžbi 3.18.:

$$w_s = 12,114 \cdot \frac{268,88}{232,48} = 14,011 \text{ m/s}$$

Za izračun ukupnog koeficijenta prijelaza topline za cijevi u lamelnom izmjenjivaču topline, prvo se mora izračunati koeficijent prijelaza u slučaju nastrijavanja tekućine na snop cijevi, ne uzimajući u obzir lamele. Reynoldsov broj se dobiva iz izraza:

$$Re = \frac{w_s \cdot d_0}{\nu_{zr}} = \frac{14,011 \cdot 0,0167}{1,4992 \cdot 10^{-5}} = 15607,24 \quad (3.21.)$$

Prandtlov broj se računa prema izrazu:

$$Pr = \frac{\mu_{zr} \cdot c_{p,zr}}{\lambda_{zr}} = \frac{1,8037 \cdot 10^{-5} \cdot 1,005825 \cdot 10^3}{0,0253} = 0,717 \quad (3.22.)$$

Budući da je $Re > 2300$, radi se o turbulentnom strujanju zraka te se Nusseltov broj računa prema sljedećem izrazu:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,22 \cdot Re^{0,6} \left(\frac{A}{A_{t0}} \right)^{-0,15} \cdot Pr^{1/3} \\ &= 0,22 \cdot 15607,24^{0,6} \cdot \left(\frac{5,098}{2,623 \cdot 10^{-2}} \right)^{-0,15} \cdot 0,717^{1/3} = 29,307 \end{aligned} \quad (3.23.)$$

Koeficijent prijelaza topline u slučaju nastrujavanja vode na snop cijevi, ne uzimajući u obzir lamele proizlazi iz:

$$\alpha_m = \frac{Nu \cdot \lambda_{zr}}{d_0} = \frac{29,307 \cdot 0,0253}{0,0167} = 44,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad (3.24.)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani zraka, uzimajući u obzir i lamele, tzv. virtualni koeficijent prijelaza topline, računa se pomoću vrijednosti iskoristivosti lamela, η_f . Budući da su dimenzije lamela i cijevi iste kao u poglavlju 2.2.1., vrijednosti φ' i φ su također jednake vrijednostima u 2.2.1. poglavlju.

$$\varphi' = 30,85 \quad (3.25.)$$

$$\varphi_{uk} = 65,676 \quad (3.26.)$$

$$\varphi = 4,105 \quad (3.27.)$$

Operator X se računa prema izrazu:

$$X = \varphi \cdot \frac{d_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_m}{\lambda_f \cdot \delta_f}} = 4,105 \cdot \frac{0,0167}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 44,4}{207 \cdot 0,00018}} = 1,6733 \quad (3.28.)$$

Pomoću operatora X , dobiva se iskoristivost lamela kod pretpostavljene duljine cijevi:

$$\eta_f = \frac{\tanh X}{X} = \frac{\tanh(1,6733)}{1,6733} = 0,557 = 55,7 \% \quad (3.29.)$$

Uvrštavanjem iskoristivosti lamela u izraz za virtualni koeficijent prijelaza topline, α_v , dobiva se:

$$\begin{aligned} \alpha_v &= \alpha_m \cdot \left[1 - (1 - \eta_f) \cdot \frac{A_{ft}}{A} \right] = 44,4 \cdot \left[1 - (1 - 0,557) \cdot \frac{5,074}{5,098} \right] \\ &= 24,823 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \end{aligned} \quad (3.30.)$$

3.1.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani vode

Budući da se volumni protok i temperatura vode nisu mjenjali u odnosu na poglavlje 2.2.2., koeficijent prijelaza topline na strani vode je identičan onome u prethodno navedenom poglavlju. Koeficijent prijelaza topline na strani vode iznosi:

$$\alpha_i = 3340,547 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad (3.31.)$$

3.1.2.3. Koeficijent prolaza lamelnog izmjenjivača topline

S izračunatim vrijednostima koeficijenata prijelaza topline na strani zraka i na strani vode, može se izračunati ukupni koeficijent prolaza topline za lamelni izmjenjivač topline. Ukupni koeficijent prolaza topline za lamelni izmjenjivač topline se računa prema sljedećem izrazu:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{A}{A_i} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{2 \cdot \delta_c}{2 \cdot \lambda_t} \right)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{24,823} + \frac{5,098}{2,309 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{1}{3340,547} + \frac{2 \cdot 0,001}{2 \cdot 45,4} \right)} = 8,989 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \end{aligned} \quad (3.32.)$$

3.1.3. Utjecaj cjevnih prolaza

Utjecaj cjevnih prolaza u izmjenjivaču se uzima u obzir preko korekcijskog faktora F . Korekcijski faktor F je proračunat (analitički i numerički) i dan u literaturi kao funkcija bezdimenzijskih značajki R i NTU . Izraz korekcijskog faktora F za protusmjerno strujanje ogrjevnog medija u susjednim prolazima uzet je iz VDI Heat Atlasa; [10] i glasi:

$$F = \frac{n}{NTU_1 \cdot \sqrt{R_1}} \cdot \frac{3 \sinh \left(\frac{NTU_1}{n} \sqrt{R_1} \right)}{1 + 2 \cosh \left(\frac{NTU_1}{n} \sqrt{R_1} \right)}, \quad (3.33.)$$

gdje su:

n - broj cijevnih prolaza, [-]

R_1 - omjer toplinskih kapaciteta struja u izmjenjivaču [-]

NTU_1 - broj prijenosnih jedinica [-]

Omjer toplinskih kapaciteta struja u izmjenjivaču se računa prema izrazu:

$$R_1 = \frac{C_1}{C_2} = \frac{694,681}{4033,694} = 0,1722 \quad (3.34.)$$

Broj prijenosnih jedinica (eng. Number of transfer units) se dobiva iz:

$$NTU_1 = \frac{k \cdot A_{uk}}{C_1} = \frac{8,989 \cdot 81,568}{694,681} = 1,0555 \quad (3.35.)$$

Uvrštavanjem NTU_1 i R_1 u jednadžbu 3.33., dobiva se korekcijski faktor F za protusmjerno strujanje ogrijevnog medija u susjednim prolazima za ovaj izmjenjivač:

$$F = \frac{4}{1,0555 \cdot \sqrt{0,1722}} \cdot \frac{3 \sinh\left(\frac{1,0555}{4} \sqrt{0,1722}\right)}{1 + 2 \cosh\left(\frac{1,0555}{4} \sqrt{0,1722}\right)} = 0,998$$

S dobivenim korekcijskim faktorom F , može se izračunati bezdimenzijska značajka temperaturne promjene, P_1 , prema izrazu:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1 - \exp[(R_1 - 1) \cdot NTU_1 \cdot F]}{1 - R_1 \cdot \exp[(R_1 - 1) \cdot NTU_1 \cdot F]} \\ &= \frac{1 - \exp[(0,1722 - 1) \cdot 1,0555 \cdot 0,998]}{1 - 0,1722 \cdot \exp[(0,1722 - 1) \cdot 1,0555 \cdot 0,998]} = 0,6271 \end{aligned} \quad (3.36.)$$

Iz bezdimenzijske značajke temperaturne promjene, P_1 , dobiva se izlazna temperatura vode za pretpostavljenu duljinu cijevi, l , prema izrazu:

$$\vartheta_1''^* = \vartheta_1' - P_1 \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_2') = 140 - 0,6271 \cdot (140 - 8) = 57,2228 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.37.)$$

Temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču s pretpostavljenom duljinom cijevi iznosi:

$$\Delta\vartheta_1^* = \vartheta_1' - \vartheta_1''^* = 140 - 57,2228 = 82,7772 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.38.)$$

Iz jednadžbe 3.17. vidljivo je da temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču iznosi $\Delta\vartheta_1 = 98,711 \text{ } ^\circ\text{C}$ te prema dobivenom $\Delta\vartheta_1^*$ u jednadžbi 3.38., zaključuje se kako pretpostavljena duljina cijevi nije dobra. Kako bi se pronašla valjana duljina cijevi koja bi davala $\Delta\vartheta_1^* = 98,711 \text{ } ^\circ\text{C}$, u Microsoft Excelu se koristi funkcija Goal Seek pomoću koje se pronalazi duljina cijevi l^* koja zadovoljava taj uvjet. Ta duljina iznosi:

$$l^* = 0,77 \text{ m}, \quad (3.39.)$$

a pripadajući broj lamela iznosi:

$$n_f^* = 348 \quad (3.40.)$$

3.2. Lamelni izmjenjivač topline s istosmjernim strujanjem ogrjevnog medija

Dimenzije ovog izmjenjivača, pretpostavljena duljina cijevi i parametri radnih fluida identični su onima u poglavlju 3.1.. Jedina razlika u odnosu na prethodni izmjenjivač, je ta što je strujanje ogrjevnog medija u susjednim prolazima istosmjerno. Sukladno tome, konstrukcijski i termodinamički proračun je identičan onome u poglavljima 3.1.1. i 3.1.2.. Budući da se konstrukcijski i termodinamički proračun nalaze u prethodno navedenim poglavljima, proračun duljine cijevi ovog izmjenjivača kreće od utjecaja cjevnih prolaza u izmjenjivaču.

3.2.1. Utjecaj cjevnih prolaza

Utjecaj cjevnih prolaza u izmjenjivaču za istosmjerno strujanje ogrijevnog medija u susjednim prolazima se računa prema izrazima iz VDI Heat Atlasa; [10]. Preko bezdimenzijskih varijabli δ_i i μ_i , dobiva se bezdimenzijska značajka temperaturne promjene P_1 iz koje se, kao u prethodnom poglavlju, dobiva $\vartheta_1'^*$ i $\Delta\vartheta_1^*$, a zatim i stvarna duljina cijevi l^* .

Bezdimenzijska značajka temperaturne promjene, P_1 , proizlazi iz izraza:

$$\frac{1}{1 - P_1} = \exp(B) \prod_{j=0}^{n-1} \delta_j = \exp(B) \cdot (\delta_0 \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3), \quad (3.41.)$$

gdje je:

n - broj cjevnih prolaza, [-]

Bezdimenzijska varijabla μ_i se računa prema izrazu::

$$\mu_{j+1} = \frac{1}{j+1} [(R_1 B^2 + 2ja + a)\mu_j - ja^2 \mu_{j-1}]; \quad j = 1, 2 \quad (3.42.)$$

gdje su:

$$a = \exp\left(-\frac{R_1 \cdot NTU_1}{n}\right) = \exp\left(-\frac{0,1722 \cdot 1,0555}{4}\right) = 0,9556 \quad (3.43.)$$

$$B = \frac{1-a}{R_1} = \frac{1-0,9556}{0,1722} = 0,2578 \quad (3.44.)$$

$$\mu_0 = 1; \mu_1 = 0 \quad (3.45.)$$

Ako je:

$$j = 1$$

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \frac{1}{2} [(R_1 B^2 + 3a)\mu_1 - a^2 \mu_0] \\ &= \frac{1}{2} [(0,1722 \cdot 0,2578^2 + 3 \cdot 0,9556) \cdot 0 - 0,9556^2 \cdot 1] = -0,4566 \end{aligned} \quad (3.46.)$$

$$j = 2$$

$$\begin{aligned} \mu_3 &= \frac{1}{3} [(R_1 B^2 + 5a)\mu_2 - 2a^2 \mu_1] \\ &= \frac{1}{3} [(0,1722 \cdot 0,2578^2 + 5 \cdot 0,9556) \cdot (-0,4566) - 2 \cdot 0,9556^2 \cdot 0] \\ &= -0,7289 \end{aligned} \quad (3.47.)$$

Bezdimenzijska varijabla δ_i se računa prema izrazu:

$$\delta_i = \delta_1 - \sum_{j=2}^i \frac{\mu_j - a\mu_{j-1}}{\prod_{k=i-1+1}^{j-1} \delta_k}; \quad i = 2, 3 \quad (3.48.)$$

gdje su:

$$\delta_0 = 1 \quad (3.49.)$$

$$\delta_1 = \exp(B) - R_1 B^2 = \exp(0,2578) - 0,1722 \cdot 0,2578^2 = 1,2826 \quad (3.50.)$$

Ako je:

$$i = 2$$

$$\delta_2 = \delta_1 - \frac{\mu_2 - a\mu_1}{\delta_1} = 1,2826 - \frac{-0,4566 - 0,9556 \cdot 0}{1,2826} = 1,6386 \quad (3.51.)$$

$$i = 3$$

$$\begin{aligned} \delta_3 &= \delta_1 - \left(\frac{\mu_2 - a\mu_1}{\delta_2} + \frac{\mu_3 - a\mu_2}{\delta_1 \cdot \delta_2} \right) \\ &= 1,2826 - \left(\frac{-0,4566 - 0,9556 \cdot 0}{1,6386} + \frac{-0,7289 + 0,9556 \cdot 0,4566}{1,2826 \cdot 1,6386} \right) \\ &= 1,7 \end{aligned} \quad (3.52.)$$

Dobivene vrijednosti bezdimenzijskih varijabli, δ_i i μ_i , se uvrštavaju u jednadžbu 3.41. iz koje se dobiva bezdimenzijska značajka temperaturne promjene, P_1 :

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 - \frac{1}{\exp(B) \cdot (\delta_0 \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3)} \\ &= 1 - \frac{1}{\exp(0,2578) \cdot (1 \cdot 1,2826 \cdot 1,6386 \cdot 1,7)} = 0,7837 \end{aligned} \quad (3.53.)$$

Iz bezdimenzijske značajke temperaturne promjene, P_1 , dobiva se izlazna temperatura vode za pretpostavljenu duljinu cijevi, l , prema izrazu:

$$\vartheta_1''^* = \vartheta_1' - P_1 \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_2') = 140 - 0,7837 \cdot (140 - 8) = 36,5516 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.54.)$$

Temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču s pretpostavljenom duljinom cijevi iznosi:

$$\Delta\vartheta_1^* = \vartheta_1' - \vartheta_1''^* = 140 - 36,5516 = 103,4484 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.55.)$$

Iz jednadžbe 3.17. vidljivo je da temperaturna razlika struje vode u izmjenjivaču iznosi $\Delta\vartheta_1 = 98,711 \text{ } ^\circ\text{C}$ te prema dobivenom $\Delta\vartheta_1^*$ u jednadžbi 3.55., zaključuje se kako pretpostavljena duljina cijevi nije dobra. Kako bi se pronašla valjana duljina cijevi koja bi davala $\Delta\vartheta_1^* = 98,711 \text{ } ^\circ\text{C}$, u Microsoft Excelu koristi se funkcija Goal Seek pomoću koje se pronalazi duljina cijevi l^* koja zadovoljava taj uvjet. Ta duljina iznosi:

$$l^* = 0,38 \text{ m}, \quad (3.56.)$$

a pripadajući broj lamela iznosi:

$$n_f^* = 173 \quad (3.57.)$$

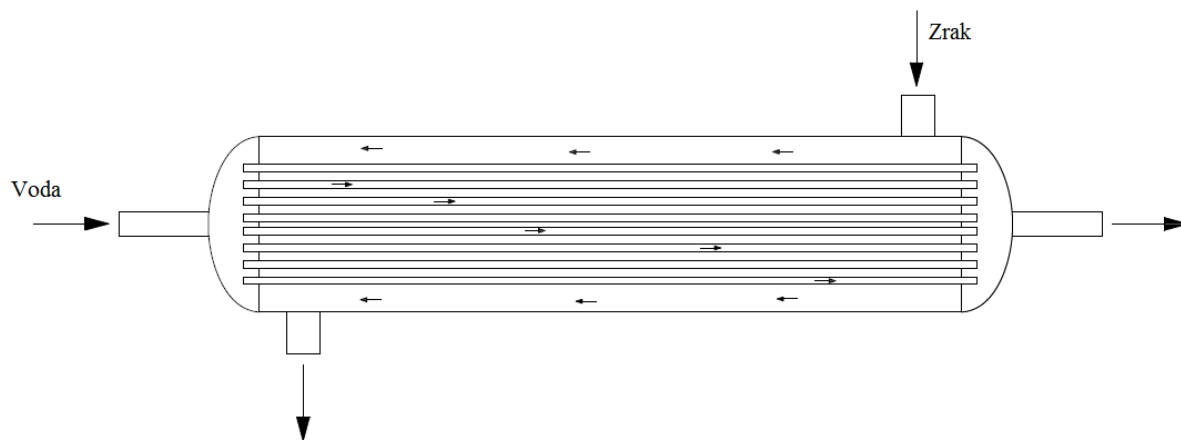
3.3. Shell and Tube izmjenjivač topline

Potrebno je pomoću zadanih parametara zraka u Tablica 3.1. i ulaznom temperaturom vode, $\vartheta'_1 = 140$ [°C], izračunati površinu Shell and Tube izmjenjivača topline, tj. duljinu izmjenjivača, kako bi se zadovoljio zadani toplinski učin. Osim parametara vode i zraka, zadane su i dimenzije cijevi u Tablica 3.5..

Tablica 3.5. Dimenzije cijevi

Vanjski promjer cijevi, d_0	[mm]	16,7
Debljina cijevi, δ_c	[mm]	1

Pretpostavlja se protusmjerno strujanje radnih fluida u izmjenjivaču prema Slika 3.1..



Slika 3.1. Protusmjerni Shell and Tube izmjenjivač topline

3.3.1. Konstrukcijski proračun

Budući da dimenzije izmjenjivača i broj cijevi u izmjenjivaču nisu zadani, uzimaju se proizvoljno te se s njima provodi konstrukcijski proračun. Nakon provedenog konstrukcijskog i termodinamičkog proračuna, iterativnim postupkom će se pronaći valjana duljina izmjenjivača i broj cijevi.

Za unutarnji promjer plašta se uzima:

$$D_i = 700 \text{ mm}, \quad (3.58.)$$

a pretpostavlja se duljina izmjenjivača i broj cijevi u izmjenjivaču u iznosu od:

$$l = 600 \text{ mm} \quad (3.59.)$$

$$n_c = 350 \quad (3.60.)$$

S prethodno navedenim parametrima, kreće se u konstrukcijski proračun.

Površina poprečnog presjeka plašta:

$$A_i = \frac{D_i^2 \pi}{4} = \frac{0,7^2 \cdot \pi}{4} = 0,3848 \text{ m}^2 \quad (3.61.)$$

Površina presjeka kroz koju struji zrak:

$$A_0 = A_i - n_c \cdot \frac{d_0^2 \pi}{4} = 0,3848 - 350 \cdot \frac{0,0167^2 \cdot \pi}{4} = 0,3081 \text{ m}^2 \quad (3.62.)$$

Površina izmjene topline jedne cijevi:

$$A_t = d_0 \pi l = 0,0167 \cdot \pi \cdot 0,6 = 0,0315 \text{ m}^2 \quad (3.63.)$$

Ukupna površina izmjene topline:

$$A_{t,uk} = n_c \cdot A_t = 350 \cdot 0,0315 = 11,025 \text{ m}^2 \quad (3.64.)$$

Površina poprečnog presjeka jedne cijevi:

$$A_u = \frac{d_0^2 \pi}{4} = \frac{0,0167^2 \cdot \pi}{4} = 2,19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (3.65.)$$

Ukupna površina kroz koju struji voda:

$$A_{u,uk} = n_c \cdot A_u = 350 \cdot 2,19 \cdot 10^{-4} = 0,0767 \text{ m}^2 \quad (3.66.)$$

3.3.2. Termodinamički proračun

Kroz cijevi izmjenjivača struji voda koja predaje toplinski tok, preko stijenki cijevi, zraku koji struji u slobodnom prostoru između cijevi i plašta. Zrak struji suprotno od smjera strujanja vode u cijevima te se stoga radi o protusmjernom izmjenjivaču topline prikazanom na Slika 3.1.. Budući da su temperaturne razlike struja identične onima u poglavlju 3.1.2., svojstva zraka i vode uzimaju se za iste temperature i identična su onima u Tablica 3.1. i Tablica 3.2..

I u ovom slučaju, jača struja je u cijevi, tj. voda dobiva indeks 1, a slabija struja struji među cijevima i plaštom, tj. zrak dobiva indeks 2. Uz očitana svojstva, zadane parametre i prethodno izračunate podatke, kreće se u termodinamički proračun:

Iz zadane temperaturne razlike struje zraka te volumnog protoka zraka, računa se toplinski tok koji voda predaje zraku:

$$\begin{aligned} \phi &= C_2 \cdot \Delta\vartheta_2 = q_{m,zr} \cdot c_{p,zr} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') = \rho_{zr} \cdot q_{v,zr} \cdot c_{p,zr} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') \\ &= 1,2031 \cdot \frac{12000}{3600} \cdot 1,005825 \cdot 10^3 \cdot (25 - 8) = 68,5728 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.67.)$$

Pomoću ϕ , na kraju proračuna, dobit će se odgovarajuća duljina cijevi u izmjenjivaču, tj. duljina izmjenjivača.

3.3.2.1. Koeficijent prijelaza na strani zraka

Za izračun koeficijenta prijelaza topline na strani zraka, potrebna je brzina strujanja zraka koja se dobiva iz volumnog protoka zraka prema izrazu:

$$w_{zr} = \frac{q_{v,zr}}{A_0} = \frac{12000}{3600} \div 0,3081 = 10,819 \text{ m/s}, \quad (3.68.)$$

Reynoldsov broj se dobiva iz izraza:

$$Re = \frac{w_{zr} \cdot d_{ekv}}{\nu_{zr}}, \quad (3.69.)$$

gdje je:

d_{ekv} - ekvivalentni promjer, [mm]

Ekvivalentni promjer se dobiva prema izrazu:

$$d_{ekv} = \frac{4 \cdot A_0}{O} = \frac{4 \cdot A_0}{(n_c \cdot d_0 + D_i)\pi} = \frac{4 \cdot 0,3081}{(350 \cdot 0,0167 + 0,7)\pi} = 0,0599 \text{ m} \quad (3.70.)$$

Uvrštavanjem d_{ekv} u jednažbu 3.69., dobiva se vrijednost Reynoldsovog broja:

$$Re = \frac{10,819 \cdot 0,0599}{1,4992 \cdot 10^{-5}} = 43299$$

Prandtllov broj se računa prema izrazu:

$$Pr = \frac{\mu_{zr} \cdot c_{p,zr}}{\lambda_{zr}} = \frac{1,8037 \cdot 10^{-5} \cdot 1,005825 \cdot 10^3}{0,0253} = 0,717 \quad (3.71.)$$

Budući da je $Re > 2300$, radi se o turbulentnom strujanju zraka te se Nusseltov broj računa prema izrazu iz VDI Heat Atlas; [10]:

$$Nu = \frac{\frac{\zeta}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{ekv}}{l} \right)^{2/3} \right], \quad (3.72.)$$

gdje je:

$$\zeta = (1,8 \cdot \log_{10} Re - 1,5)^{-2} = (1,8 \cdot \log_{10} 43299 - 1,5)^{-2} = 0,0213 \quad (3.73.)$$

Uvrštavanjem dobivenog parametra, ζ , u jednažbu 3.72., dobiva se Nusseltov broj za turbulentno strujanje zraka između cijevi i plašta:

$$Nu = \frac{\frac{0,0213}{8} \cdot 43299 \cdot 0,717}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{0,0213}{8}} \cdot (0,717^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,0599}{0,6} \right)^{2/3} \right] = 115,525$$

S dobivenim Nusseltovim brojem, sada se može izračunati koeficijent prijelaza topline na strani zraka, α_{zr} :

$$\alpha_{zr} = \frac{Nu \cdot \lambda_{zr}}{d_{ekv}} = \frac{115,525 \cdot 0,0253}{0,06} = 48,713 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad (3.74.)$$

3.3.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani vode

Budući da protok vode nije zadan, a kako bi se mogla izračunati brzina vode, pretpostavlja se izlazna temperatura vode $\vartheta_1'' = 115$ [°C]. S pretpostavljenom izlaznom temperaturom vode, može se iz toplinskog toka, dobivenog u jednadžbi 3.67., izračunati maseni protok vode prema izrazu:

$$q_{m,w} = \frac{\phi}{c_{p,w} \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_1'')} = \frac{68,5728}{4,286 \cdot (140 - 115)} = 0,64 \text{ kg/s}, \quad (3.75.)$$

iz čega se dobiva brzina strujanja vode u cijevi:

$$w_w = \frac{q_{m,w}}{A_{u,uk} \cdot \rho_w} = \frac{0,64}{0,0767 \cdot 926,18} = 0,009 \text{ m/s}, \quad (3.76.)$$

S dobivenom brzinom vode, može se izračunati Reynoldsov broj strujanja vode u cijevi:

$$Re = \frac{w_w \cdot d_i}{\nu_w} = \frac{0,009 \cdot 0,0147}{2,1221 \cdot 10^{-7}} = 623,44 \quad (3.77.)$$

Prandtllov broj se računa prema izrazu:

$$Pr = \frac{\mu_w \cdot c_{p,w}}{\lambda_w} = \frac{1,9654 \cdot 10^{-4} \cdot 4,286 \cdot 10^3}{0,6833} = 1,2328 \quad (3.78.)$$

Budući da je $Re < 2300$, voda struji laminarno te se Nusseltov broj računa prema sljedećem izrazu iz VDI Heat Atlasa; [10]:

$$Nu = \left[Nu_{m,q,1}^3 + 0,6^3 + [Nu_{m,q,2} - 0,6]^3 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (3.79.)$$

gdje su:

$$Nu_{m,q,1} = 4,364 \quad (3.80.)$$

$$\begin{aligned} Nu_{m,q,2} &= 1,953 \cdot \sqrt[3]{Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{l}} = 1,953 \cdot \sqrt[3]{623,44 \cdot 1,2328 \cdot \frac{0,0147}{0,6}} \\ &= 5,1984 \end{aligned} \quad (3.81.)$$

Uvrštavanjem $Nu_{m,q,1}$ i $Nu_{m,q,2}$ u jednadžbu 3.79., dobiva se Nusseltov broj za laminarno strujanje vode u cijevi:

$$Nu = [4,364^3 + 0,6^3 + [5,1984 - 0,6]^3]^{\frac{1}{3}} = 5,6520$$

S dobivenim Nusseltovim brojem, sada se može izračunati koeficijent prijelaza topline na strani vode, α_w :

$$\alpha_w = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_i} = \frac{5,6520 \cdot 0,6833}{0,0147} = 262,723 \quad \frac{W}{m^2 K} \quad (3.82.)$$

3.3.2.3. Koeficijent prolaza Shell and Tube izmjenjivača topline

S izračunatim vrijednostima koeficijenata prijelaza topline na strani zraka i na strani vode, može se izračunati ukupni koeficijent prolaza topline za Shell and Tube izmjenjivač topline. Ukupni koeficijent prolaza topline za Shell and Tube izmjenjivač topline se računa prema sljedećem izrazu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{zr}}} = \frac{1}{\frac{1}{262,723} + \frac{0,001}{45,4} + \frac{1}{48,713}} = 41,043 \quad \frac{W}{m^2 K} \quad (3.83.)$$

3.3.3. Stvarna duljina izmjenjivača i izlazna temperatura vode

S pretpostavljenom izlaznom temperaturom vode i dobivenim koeficijentom prolaza topline, može se izračunati toplinski tok predan zraku prema izrazu:

$$\phi^* = k \cdot \Delta\vartheta_m \cdot A_{t,uk} \quad kW, \quad (3.84.)$$

gdje je:

$\Delta\vartheta_m$ - srednja logaritamska temperaturna razlika, [°C]

Srednja logaritamska temperaturna razlika se računa prema izrazu:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_m &= \frac{\Delta\vartheta_V - \Delta\vartheta_M}{\ln\left(\frac{\Delta\vartheta_V}{\Delta\vartheta_M}\right)} = \frac{\vartheta'_1 - \vartheta'_2 - (\vartheta''_1 - \vartheta'_2)}{\ln\left(\frac{\vartheta'_1 - \vartheta'_2}{\vartheta''_1 - \vartheta'_2}\right)} \\ &= \frac{140 - 25 - (115 - 8)}{\ln\left(\frac{140 - 25}{115 - 8}\right)} = 110,952 \quad ^\circ C \end{aligned} \quad (3.85.)$$

Uvrštavanjem $\Delta\vartheta_m$ u jednadžbu 3.84., dobiva se toplinski tok s pretpostavljenom duljinom cijevi i izlaznom temperaturom vode:

$$\phi^* = 41,194 \cdot 110,952 \cdot 11,025 = 50,172 \text{ kW} \quad (3.86.)$$

Iz jednadžbe 3.67. vidljivo je da toplinski tok u izmjenjivaču iznosi $\phi = 68,5728 \text{ kW}$ te prema dobivenom ϕ^* u jednadžbi 3.86. zaključuje se kako pretpostavljena duljina cijevi i izlazna temperatura vode nisu dobre. Kako bi se pronašla valjana duljina cijevi i izlazna temperatura vode koje bi davale $\phi^* = 68,5728 \text{ kW}$, u Microsoft Excelu se koristi funkcija Solver pomoću koje se dobivaju sljedeće vrijednosti:

$$l^* = 0,68 \text{ m} \quad (3.87.)$$

$$n_c^* = 396 \quad (3.88.)$$

$$\vartheta_1'' = 122,92 \text{ °C} \quad (3.89.)$$

$$w_w = 0,0117 \text{ m/s} \quad (3.90.)$$

$$w_{zr} = 11,177 \text{ m/s} \quad (3.91.)$$

3.3.4. Utjecaj promjene geometrijskih karakteristika izmjenjivača

Promjenom promjera plašta izmjenjivača, D_i , i broja cijevi u izmjenjivaču, n_c , može se utjecati na koeficijente prijelaza topline na strani vode i na strani zraka, a samim time i na duljinu izmjenjivača. Utjecaj njihove promjene je prikazan u Tablica 3.6..

Tablica 3.6. Utjecaj promjene geometrijskih karakteristika izmjenjivača

D_i , [m]	n_c	α_w , [W/(m K)]	α_{zr} , [W/(m K)]	w_w , [m/s]	w_{zr} , [m/s]	l , [m]
0,7	366	296,406	48,3948	0,0187	10,937	0,747
0,7	502	254,014	57,5859	0,0063	12,117	0,501
0,6	327	275,819	67,1680	0,0123	15,779	0,653
0,8	510	256,536	41,2937	0,0084	8,524	0,632
0,4	117	333,332	110,117	0,0462	33,298	1,167

Iz Tablica 3.6. je vidljivo kako smanjenjem broja cijevi, za isti D_i kao u prethodnom proračunu, brzina vode u cijevi raste, a samim time i koeficijent prijelaza topline na strani vode. S druge

strane, smanjuje se površina izmjene topline na strani zraka, a time i koeficijent prijelaza topline na strani zraka te je potrebna veća duljina cijevi kako bi se zrak zagrijao na zadanu temperaturu. Suprotno se dešava u slučaju povećanja broja cijevi, ali tada bi brzina vode u cijevi bila premala što nije poželjno.

Smanjenjem promjera plašta i uzimanjem približno istog broja cijevi kao u prethodnom proračunu, brzina vode, koeficijent prijelaza topline na strani vode i duljina izmjenjivača ispadaju približno iste dok brzina zraka raste te premašuje preporučene vrijednosti. S druge strane, povećanjem promjera plašta, brzina zraka pada, a time i koeficijent prijelaza na strani zraka, a kako se uzima veći broj cijevi koji bi ispunio plašt, brzina vode u njima pada što nije poželjno.

Velikim smanjenjem promjera plašta i broja cijevi, brzina vode malo poraste, a brzina zraka naglo poraste. S tako malom brzinom vode u cijevima je teško zagrijati zrak tako velike brzine, tj. potreban je puno dulji izmjenjivač kako bi se toplina mogla izmijeniti.

3.4. Analiza dobivenih rezultata

Za zadovoljavanje jednakog toplinskog učina, proračunavale su se površine, tj. duljine, triju izmjenjivača topline: lamelnog s protusmjernim i istosmjernim strujanjem ogrjevnog medija u susjednim prolazima te Shell and Tube izmjenjivača topline. Dobivene duljine izmjenjivača za zadani toplinski učin, $\phi = 68,5728$ kW, navedene su u Tablica 3.7..

Tablica 3.7. Duljine izmjenjivača topline

	<i>l</i> , [m]
Lamelni izmjenjivač topline s protusmjernim strujanjem ogrjevnog medija	0,77
Lamelni izmjenjivač topline s istosmjernim strujanjem ogrjevnog medija	0,38
Shell and Tube izmjenjivač topline	0,68

Iz priloženih rezultata, vidljivo je kako je lamelni izmjenjivač topline s istosmjernim strujanjem ogrjevnog medija u susjednim prolazima najkraći, tj. u njemu je prijenos topline najintenzivniji jer je temperaturna razlika između zraka i vode po površini izmjenjivača najveća. Naime, voda u cjevnim prolazima ulazi uvijek s iste strane gdje je temperatura zraka niža u odnosu na temperaturu zraka s druge strane izmjenjivača pa je samim time i prijenos topline između zraka i vode intenzivniji. U lamelnim izmjenjivačima s protusmjernim tokom ogrjevnog medija, voda nakon izlaska iz izmjenjivača ponovno ulazi s te iste strane gdje je zrak već zagrijan u prošlom

prolazu te je prijenos topline između zraka i vode manje intenzivan, a samim time potrebna je i veća duljina cijevi, tj. izmjenjivača, za zagrijavanje zraka na zadanu temperaturu. U Shell and Tube izmjenjivaču topline zadanih dimenzija, prijenos topline je nešto intenzivniji nego kod lamelnog izmjenjivača s protusmjernim strujanjem ogrjevnog medija. Prijenos topline bi se mogao još više pospješiti, tj. izmjenjivač skratiti, da se poveća broj cijevi u plaštu izmjenjivača, ali povećanjem broja cijevi, povećava se i brzina zraka u izmjenjivaču te premašuje preporučene vrijednosti. Također, u ovom slučaju brzina vode u cijevi je vrlo mala, a samim time i koeficijent prijelaza topline u cijevi. U realnom slučaju uzeli bi se drugačiji parametri radnih fluida za ovakav izmjenjivač topline. Ovdje se oni nisu mijenjali jer je cilj bio prikazati usporedbu gore navedenih izmjenjivača za jednako zagrijavanje zraka.

4. ZAKLJUČAK

Nakon provedenog proračuna lamelnog izmjenjivača topline i usporedbe istih te Shell and Tube izmjenjivača topline, dobiveni su sljedeći rezultati:

Tablica 4.1. Rezultati usporedbe izmjenjivača

	Lamelni izmjenjivač topline - protusmjerno strujanje ogrjevnog medija	Lamelni izmjenjivač topline - istosmjerno strujanje ogrjevnog medija	Shell and Tube izmjenjivač topline
$q_{m,zr}$, [kg/s]	4,010	4,010	4,010
$q_{m,w}$, [kg/s]	0,162	0,162	0,937
$\Delta\vartheta_w$, [°C]	98,711	98,711	17,075
$\Delta\vartheta_{zr}$, [°C]	17	17	17
kA , [W/K]	1044,597	572,546	596,480
l , [m]	0,77	0,38	0,68

U Tablica 4.1. nisu navedeni rezultati dobiveni u 2. poglavlju budući da se tamo htio prikazati primjer proračuna lamelnog izmjenjivača topline s protusmjernim strujanjem ogrjevnog medija koji se u 3. poglavlju koristio pri usporedbi ostalih tipova izmjenjivača.

Prije svega, duljina izmjenjivača ovisi o protočnoj količini zraka koju treba zagrijati. Pri usporedbi izmjenjivača navedenih u Tablica 4.1., koristila se jednaka protočna količina zraka, ali povećanjem protočne količine zraka, povećava se i duljina izmjenjivača.

Drugi važan parametar je konstrukcija izmjenjivača. Kod lamelnih izmjenjivača, različite se duljine izmjenjivača dobivaju za protusmjerno i istosmjerno strujanje ogrjevnog medija. Prema dobivenim rezultatima u Tablica 4.1., vidljivo je da je duljina lamelnog izmjenjivača s istosmjernim strujanjem ogrjevnog medija manja, a razlog tomu je veća temperaturna razlika između radnih fluida po površini izmjenjivača. U ovom proračunu zanemarivali su se toplinski gubici cjevnih prolaza koji bi u slučaju istosmjernog strujanja ogrjevnog medija bili vrlo vjerojatno veliki te bi onda i duljina takvog izmjenjivača bila dulja, ali ne nužno dulja od izmjenjivača s protusmjernim strujanjem ogrjevnog medija. Konstrukcija Shell and Tube izmjenjivača kod ovakvog slučaja zagrijavanja zraka nije najbolji odabir. Zadani vrlo mali promjer cijevi iziskuje veću površinu izmjene topline, tj. broj cijevi postavljenih u plaštu, a povećanjem broja cijevi, brzina zraka prelazi dozvoljenu granicu. Sukladno tome, broj cijevi u izmjenjivaču je ograničen, a kako bi se ostvario zadani toplinski učin, jedina je opcija povećanje duljine izmjenjivača.

Ovakav slučaj zagrijavanja zraka najlakše je ostvariti u lamelnom izmjenjivaču topline. Naime, kod lamelnih izmjenjivača topline, velike izmjenjivačke površine se postižu u relativno malom volumenu. Također, pružaju veću fleksibilnost u eksploataciji nego Shell and Tube izmjenjivači. Parametrima poput debljine lamela, razmaka između lamela ili položaja cijevi u izmjenjivaču, vrlo lako se utječe na duljinu izmjenjivača. Primjenom malo debljih lamela, može se još više smanjiti duljina izmjenjivača, a razlog tomu je veća temperatura površine lamela čime je i prijenos topline između lamele i zraka intenzivniji. Smanjenjem razmaka između lamela, može se nanizati veći broj lamela na cijevi, a time se povećava i površina izmjene topline što rezultira smanjenjem izmjenjivača. Osim ravnih lamela, mogu se koristiti i valovite lamele kod kojih je površina izmjene topline još veća ili lamele s prorezima koje omogućuju miješanje zraka između lamela, a time i veći koeficijent prijelaza topline. U Shell and Tube izmjenjivačima se također mogu primijeniti cijevi s uzdužnim lamelama, tzv. orebrene cijevi, ali takve lamele imaju puno manju površinu od onih kod lamelnih izmjenjivača topline.

LITERATURA

- [1] <http://www.thermopedia.com/content/832/> (16.02.2017.)
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger (16.02.2017.)
- [3] Termodinamika II; Antun Galović; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb (2010.)
- [4] <https://www.ktf.unist.hr/index.php/nastavni-materijali-zio/nastavni-materijali/category/143-projektiranje-procesa?download=2386:poglavlje-9-uredaji-za-prijenos-topline> uredaji za prijenos topline (16.02.2017.)
- [5] Principles of Enhanced Heat Transfer; Ralph L. Webb; John Wiley & Sons, INC.; New York (1994.)
- [6] Fundamentals of Heat Exchanger Design; Ramesh K. Shah, Dušan P. Sekulić; John Wiley & Sons, INC.; New Jersey (2003.)
- [7] Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design; Sadik Kakaç, Hongtan Liu; CRC Pres LLC; Florida (2002.)
- [8] <https://www.comsol.com/blogs/how-model-shell-and-tube-heat-exchanger/> (18.02.2017.)
- [9] Toplinske tablice; Boris Halasz, Antun Galović, Ivanka Boras; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb (2013.)
- [10] VDI Heat Atlas; Springer; Second edition (2010.)

PRILOZI

I. CD-R